

# Bの物理

石川 明正

(KEK)

将来計画委員会第三回勉強会

『BファクトリーとBの物理の現状、展望、ビヨンド。ぷらすミュオンコライダー』

# Belle II の物理 ≠ Bの物理

- コライダー実験は物理のスペクトラムが広い
- Belle II の物理
  - B、charm、 $\tau$  での新物理探索(フレーバー物理)
  - EW/QCD
    - $A_{FB}, \sigma$
    - Radiative return  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$  (ハドロン真空偏極)  $\rightarrow$  muon g-2, Higgs mass
    - Antideuteron production  $\rightarrow$  cosmic dark matter annihilation
  - 軽い(<10GeV)新粒子直接探索
    - Dark sector particles
    - Axion Like Particle
    - Light CP odd Higgs
  - Hadron 物理
  - Etc.
- 広い物理の中でもBの物理は Belle II の重要な柱である

# Belle II Physics Book

- 興味ある方は読んで下さい
  - <https://arxiv.org/abs/1808.10567>
  - <https://doi.org/10.1093/ptep/ptz106>

**PTEP**

Prog. Theor. Exp. Phys. **2019**, 123C01 (654 pages)  
DOI: 10.1093/ptep/ptz106

## The Belle II Physics Book

E. Kou<sup>75,\*,\$,†</sup>, P. Urquijo<sup>145,‡,†</sup>, W. Altmannshofer<sup>135,\$</sup>, F. Beaujean<sup>79,\$</sup>, G. Bell<sup>122,\$</sup>,  
M. Beneke<sup>114,\$</sup>, I. I. Bigi<sup>148,\$</sup>, F. Bishara<sup>150,16,\$</sup>, M. Blanke<sup>49,51,\$</sup>, C. Bobeth<sup>113,114,\$</sup>, M. Bona<sup>152,\$</sup>,  
N. Brambilla<sup>114,\$</sup>, V. M. Braun<sup>50,\$</sup>, J. Brod<sup>112,135,\$</sup>, A. J. Buras<sup>115,\$</sup>, H. Y. Cheng<sup>43,\$</sup>,  
C. W. Chiang<sup>92,\$</sup>, M. Ciuchini<sup>59,\$</sup>, G. Colangelo<sup>128,\$</sup>, A. Crivellin<sup>102,\$</sup>, H. Czyz<sup>156,29,\$</sup>,  
A. Datta<sup>146,\$</sup>, F. De Fazio<sup>53,\$</sup>, T. Deppisch<sup>51,\$</sup>, M. J. Dolan<sup>145,\$</sup>, J. Evans<sup>135,\$</sup>,  
S. Fajfer<sup>109,141,\$</sup>, T. Feldmann<sup>122,\$</sup>, S. Godfrey<sup>7,\$</sup>, M. Gronau<sup>62,\$</sup>, Y. Grossman<sup>15,\$</sup>,  
F. K. Guo<sup>45,134,\$</sup>, U. Haisch<sup>150,11,\$</sup>, C. Hanhart<sup>21,\$</sup>, S. Hashimoto<sup>30,26,\$</sup>, S. Hirose<sup>89,\$</sup>,  
J. Hisano<sup>89,90,\$</sup>, L. Hofer<sup>127,\$</sup>, M. Hoferichter<sup>168,\$</sup>, W. S. Hou<sup>92,\$</sup>, T. Huber<sup>122,\$</sup>, T. Hurth

Joint effort of theorists and experimentalists

# Introduction

# B中間子を使って何をしたい？

- 小林益川模型（標準模型）の検証
  - Belle/Babar によるB中間子でのCKM行列の決定により、すでに確立 → Nobel prize to KM (2008)
- → 新物理の発見、消えた反物質の解明
  - 新物理による標準模型からのズレ
    - 新しいCPVのソース
    - CKMの精度を上げる事は超重要
  - 新現象

# B中間子は新物理に敏感？

- 重い

- 第3世代粒子は特別？

- SU(2) partner の top の質量は EW scale → EWSB に関係する新物理
- 新物理の **Top partner/bottom partner** と結合しやすい(と思われる)
  - 同世代
  - SUSY だと第3世代は軽い
- 新物理の**ヒッグス粒子**と結合しやすい(特に b,  $\tau$  は2HDM type-IIで)

- 現象論(QCD)の**理論計算**が比較的**精密**

- 標準模型で許される過程では理論との比較が重要(理論誤差)
- $M_B \gg \Lambda_{\text{QCD}}$

- (ただ Lattice QCD屋さんにとっては大変)

# B中間子は新物理に敏感？

$\lambda=0.22$

- 実験的には新物理の影響が小さいと思われる tree も  $O(\lambda^2)$  で suppress されているので、新物理の影響があると思われる loop に access しやすい
- 歴史
  - Kaon ( $2 \rightarrow 1$ )
    - 寿命が長い変な粒子がいる。Strange  $\rightarrow$  tree :  $V_{us}=O(\lambda)$
  - B ( $3 \rightarrow 2$ )
    - Bの寿命が思ったより長い。Strange<sup>2</sup>  $\rightarrow$  tree :  $V_{cb}$  が  $O(\lambda)$  じゃなくて  $O(\lambda^2)$  だった！
- CKMが変なヒエラルキーを持っていること自体が素粒子屋にはおかしい事だった(が今では当たり前のように思われている?)。

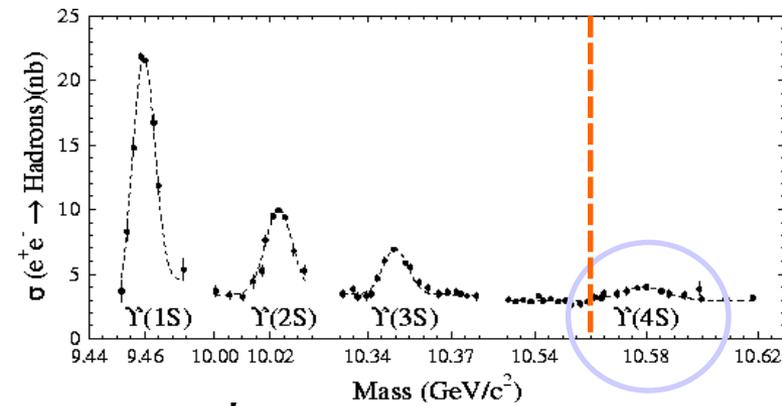
$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad 3 \rightarrow 1 \text{ は } O(\lambda^3) \text{ でここに phase が入る}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

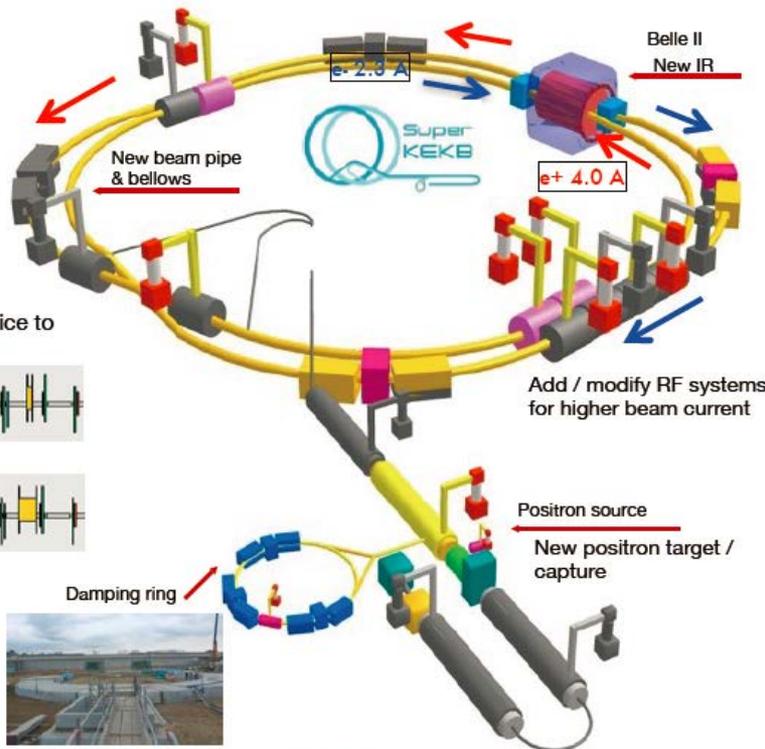
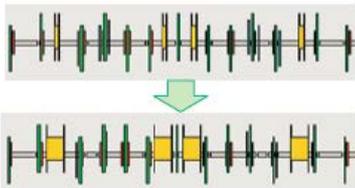
# 加速器・検出器

# SuperKEKB 加速器

- KEKB加速器の**40倍**のルミノシティー
  - Nano-beam scheme **x20**, beam current **x2**
- 非対称エネルギー **7GeV x 4GeV** ←  $\Upsilon(4S)$  resonance 上
  - 時間依存 CPV を測定するために、B中間子を Z 方向に boost
  - boost factor は KEKB より小さくなった

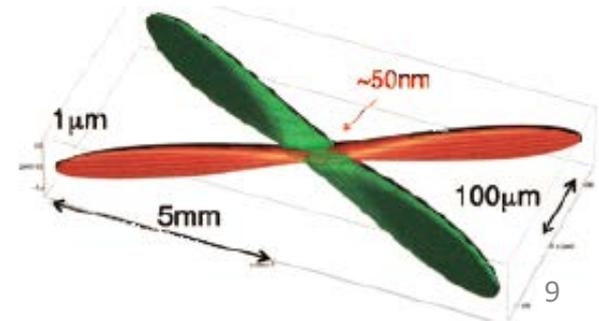


Redesign the magnetic lattice to reduce the emittance



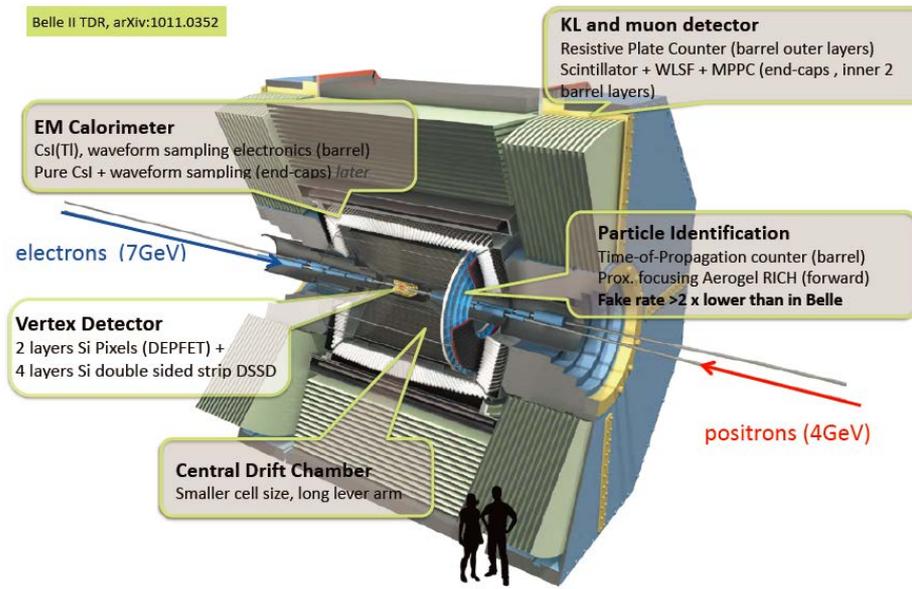
Low emittance

$$L = 8 \cdot 10^{35} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$



# Belle II 検出器

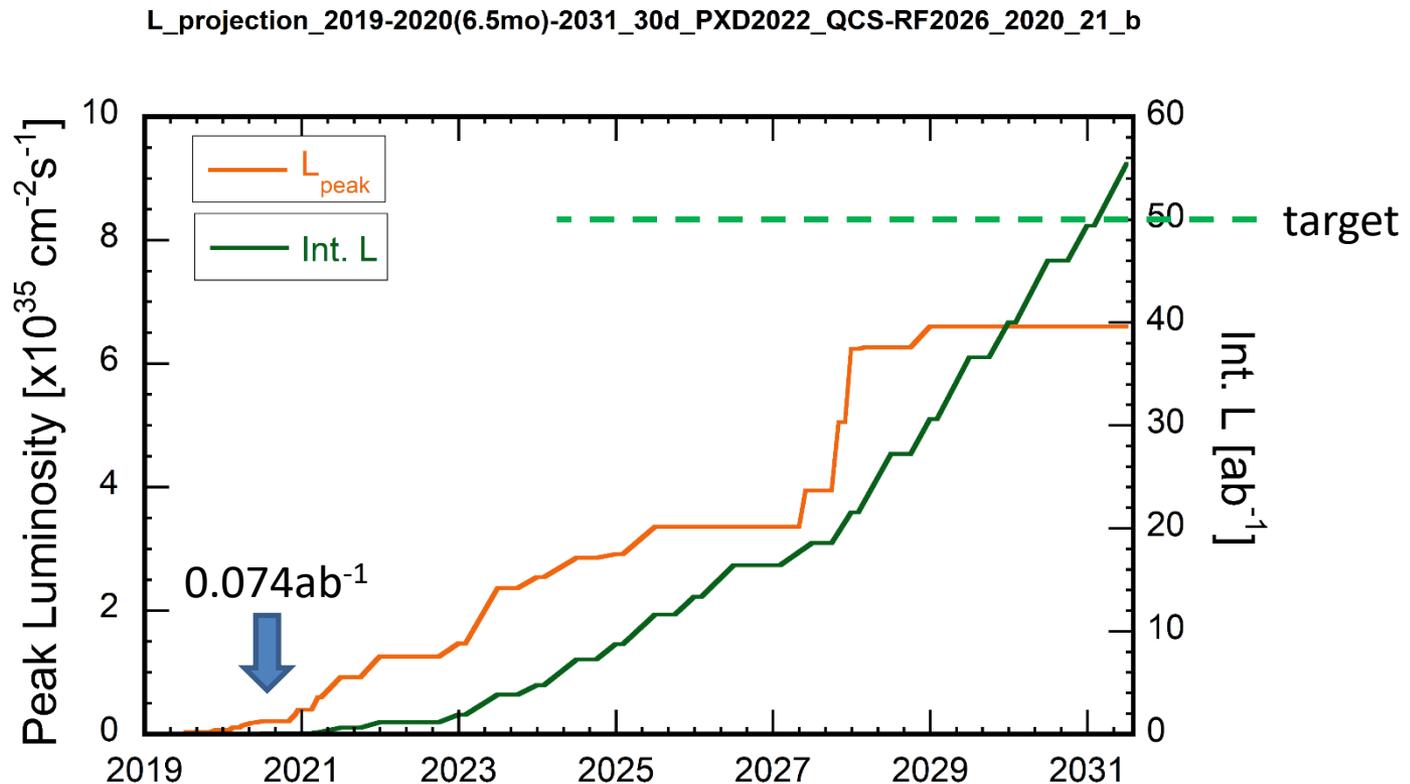
- 20倍のバックグラウンドでも Belle 検出器以上の性能を維持
  - Barrel/Forward Endcap Kaon ID の大幅な向上
    - $B \rightarrow K^* \gamma$  VS  $B \rightarrow \rho \gamma$
  - 崩壊点検出器の内層はIPに近く、外層は大きく
    - Vertex resolution の向上、long lived Ks を使った vertexing efficiency の向上
  - LHCbで苦手な  $\pi^0$ ,  $K^0$  も再構成可能、電子のIDも可能
- (ほぼ) **すべてのB中間子崩壊を記録する**
  - 逆側のBを再構成する事により、 $B^0 \rightarrow \text{nothing}$  できさえも探索可能
  - Effective flavor tagging efficiency >30% (LHCb ~3%)



# Luminosity Projection

- 2031年に $50\text{ab}^{-1}$ を収集
  - B中間子の数  $1 \times 10^{11}$

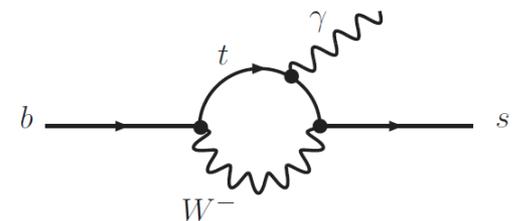
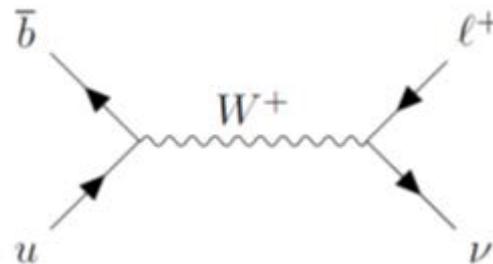
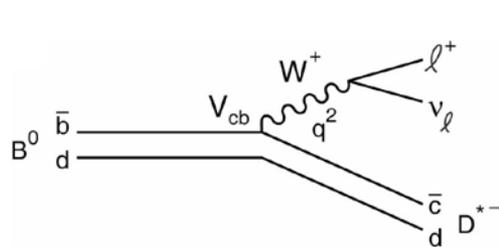
現在 <https://confluence.desy.de/display/BI/Belle+II+Luminosity>



# B中間子での新物理探索

# B中間子の崩壊

- 多様な崩壊があり、色々な測定が可能
- 新物理に敏感なモード、SM reference となるべきモード(Kの物理にも重要 $\varepsilon_K$ )
  - Tree :  $b \rightarrow c, b \rightarrow u$ 
    - Annihilation  $B \rightarrow \tau \nu, \mu \nu$
  - Loop :  $b \rightarrow s, b \rightarrow d$ 
    - Radiative decay  $b \rightarrow s \gamma, d \gamma$



# B中間子の崩壊分岐比とBの数

大西さんのお話

- 興味ある崩壊の分岐比が小さい → ルミノシティが必要
  - $B(B \rightarrow Kl+l-) = O(10^{-7})$  : Belle 1 で発見された  $b \rightarrow sl+l-$  process
  - $B(B \rightarrow \rho\gamma) = O(10^{-7})$  : Belle 1 で発見された  $b \rightarrow d\gamma$  process
  - Belle 1 のBB の数 :  $N_{BB} = 7.7 \times 10^8$
  - Belle 2 のBB の数 :  $N_{BB} = 5.0 \times 10^{10}$
- まだ、ほとんどの興味あるモードで十分な精度で測定出来ていない
  - BFの精密測定の為には $O(1000)$ イベントぐらい、CPVの精密測定の為には $O(30000)$ イベントぐらいは欲しい。
  - Differential を見るならさらに多くのイベントが欲しい
  - 逆側のBを tag する必要がある崩壊は tag efficiency  $O(0.1)\%$  により統計精度が悪くなく、多くのBが必要

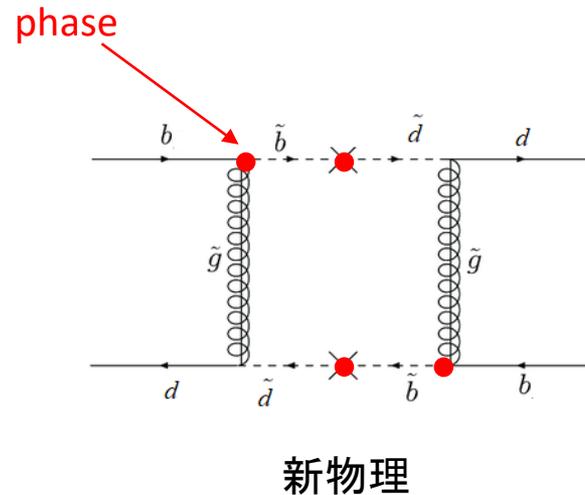
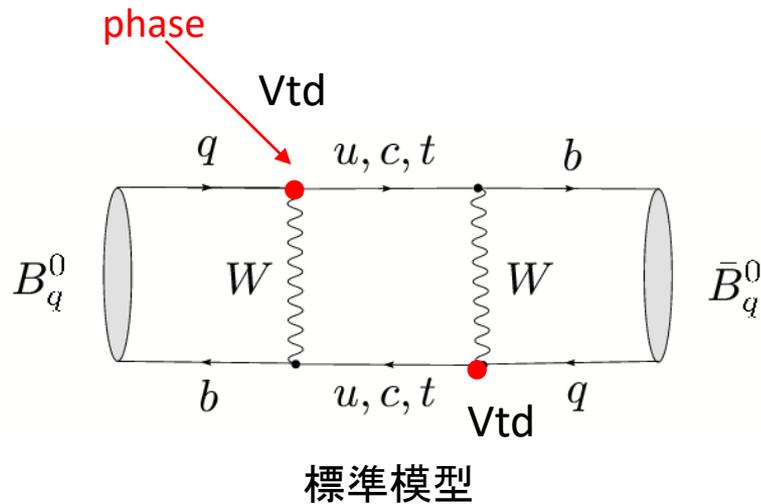
# 新物理を見るにはどのモード？

- 実験・理論の精度が良く、新物理が入ってくるモード
- ループ
  - Mixing :  $|\Delta B|=2$
  - Penguin decay :  $|\Delta B|=1$
- ツリー
  - Leptonic decay
- 現在アノマリーがあるモード(LFU Violation)
  - $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$
  - $b \rightarrow s l^+ l^-$

時間が無いので限られた物しか説明しません(できません)。  
他にも重要なモードがありますが、選択には私のバイアスが入っています。  
ご容赦下さい。

# Mixingでの新物理

- Mixing 中の新物理の振幅と位相を決めたい
- → Unitarity Triangle



# Unitarity Triangle

- Quark の weak decay では CKM element がかかる
  - Phase があるのは  $3 \rightarrow 1$  の transition  $V_{ub}, V_{td}$

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

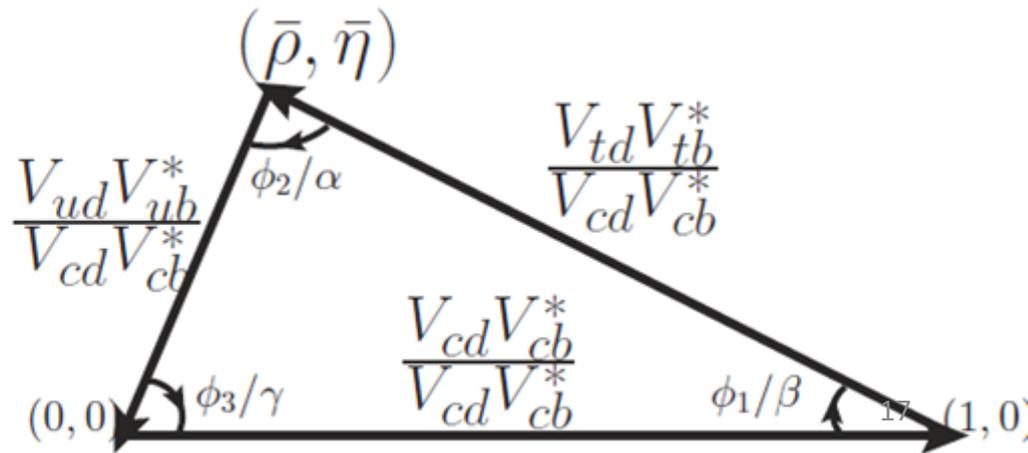
$B_d = (\bar{b}d)$  by Wolfenstein parameterization

Irreducible complex phase  
cause CP Violation!

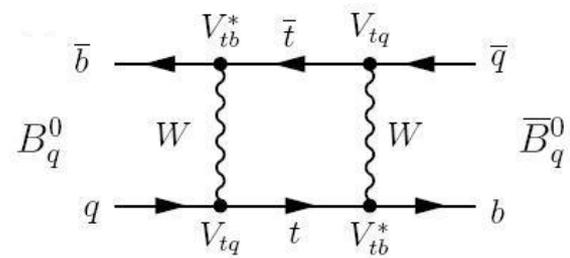
$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

Comprehensive test;  
measure all the angles and sides.

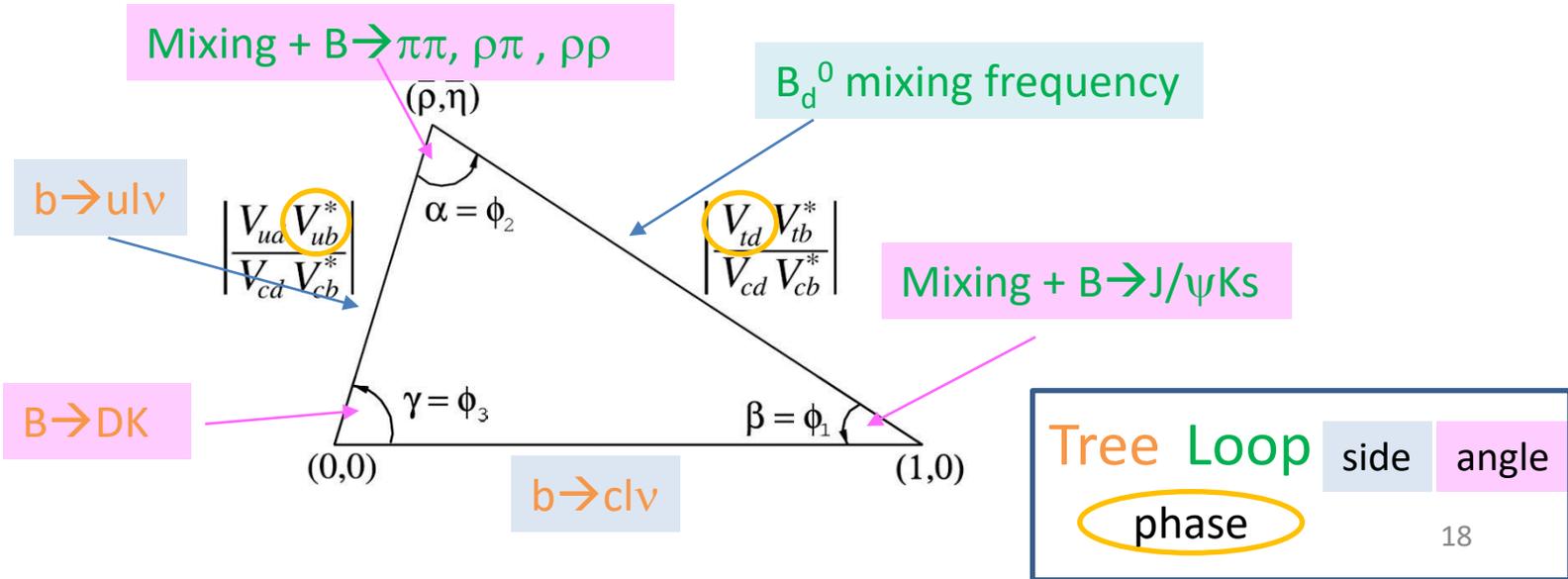
B system : very good place,  
all the angle are  $O(0.1)$ !



# Mixing 中の新物理の探索



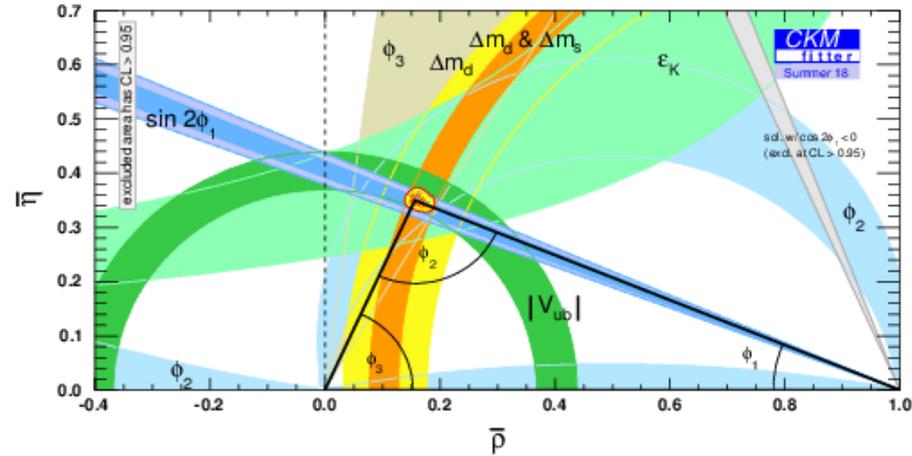
- ユニタリティー三角形を **Tree** 崩壊と **Loop** プロセスで比較
  - 新物理は **Loop** にのみ寄与すると思われる
- Belle II 実験のみが三角形の辺と角の**6つの測定量**を精度良く測定できる
  - 角 : CP Violation の測定
  - 辺 : 崩壊分岐比の測定もしくは mixing の周波数の測定
- もし、ユニタリティー三角形が **Tree** と **Loop** で異なれば**クリアな新物理の証拠**



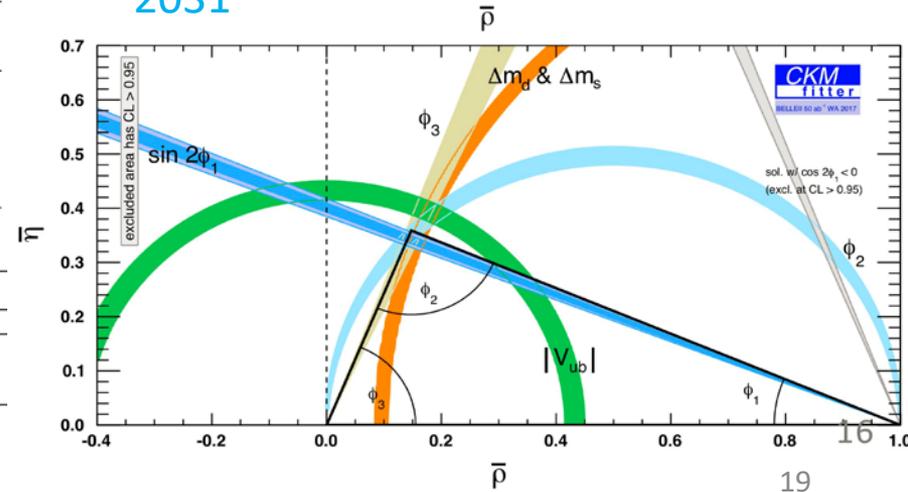
# Belle IIが始まる前と後でのユニタリティー三角形

- 誤差が大きくまだ決定的なことは言えないが、少しだけズレている
- 2013年の中心値を用いて誤差を外挿するとズレがはっきり見える
  - 全ての角を **~1度の誤差**で測定
    - $\phi_1, \phi_2$  は現象論 dominant
    - $\phi_3$  は実験 dominant
  - 全ての辺を **1~2%の誤差**で測定
    - $V_{cb}$  は現象論 dominant
    - $V_{ub}, V_{td}$  は Lattice QCD dominant

Before Belle II (2018)



2031

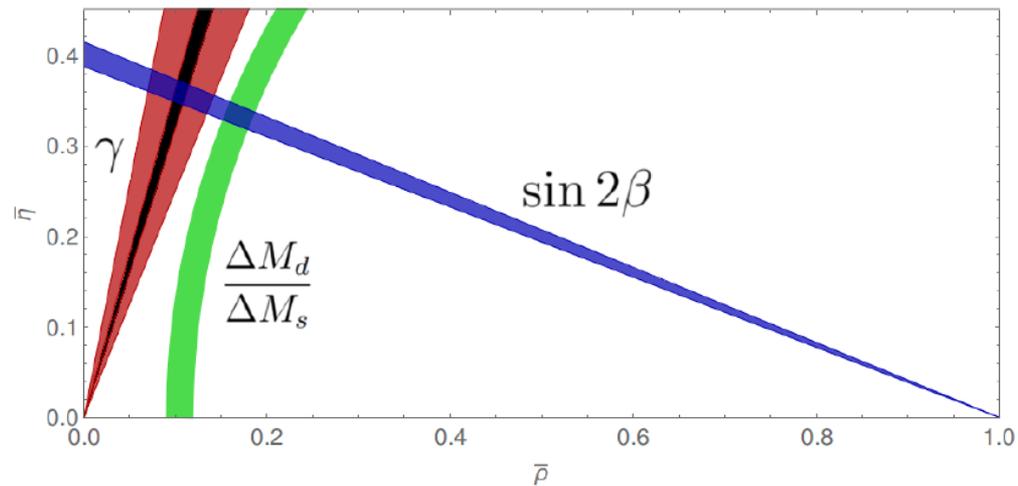


Observables	Belle (2017)	5 ab <sup>-1</sup>	Belle II 50 ab <sup>-1</sup>
$\sin 2\phi_1(B \rightarrow J/\psi K^0)$	$0.667 \pm 0.023 \pm 0.012$	0.012	0.005
$S(B \rightarrow \phi K^0)$	$0.90^{+0.09}_{-0.19}$	0.048	0.020
$S(B \rightarrow \eta' K^0)$	$0.68 \pm 0.07 \pm 0.03$	0.032	0.015
$S(B \rightarrow J/\psi \pi^0)$	$-0.65 \pm 0.21 \pm 0.05$	0.079	0.025
$\phi_2$ [°]	$85 \pm 4$ (Belle+BaBar)	2	0.6
$\phi_3$ GGSZ	$68 \pm 13$	4.7	1.5

Observables	Belle (2017)	5 ab <sup>-1</sup>	Belle II 50 ab <sup>-1</sup>
$ V_{cb} $ incl.	$42.2 \cdot 10^{-3} \cdot (1 \pm 1.8\%)$	1.2%	-
$ V_{cb} $ excl.	$39.0 \cdot 10^{-3} \cdot (1 \pm 3.0\%_{\text{ex.}} \pm 1.4\%_{\text{th.}})$	1.8%	1.4%
$ V_{ub} $ incl.	$4.47 \cdot 10^{-3} \cdot (1 \pm 6.0\%_{\text{ex.}} \pm 2.5\%_{\text{th.}})$	3.4%	3.0%
$ V_{ub} $ excl. (WA)	$3.65 \cdot 10^{-3} \cdot (1 \pm 2.5\%_{\text{ex.}} \pm 3.0\%_{\text{th.}})$	2.4%	1.2%

# Current Situation

- ズレてる？
- Hint for NP in mixing？



# EFTで新物理のスケールに変換

arXiv:1309.2293

- 200TeV の新物理スケールに到達可能

$$M_{12}^{d,s} = (M_{12}^{d,s})_{\text{SM}} \times (1 + h_{d,s} e^{2i\sigma_{d,s}})$$

$$\frac{C_{ij}^2}{\Lambda^2} (\bar{q}_{i,L} \gamma^\mu q_{j,L})^2 \quad \text{SM } h=0$$

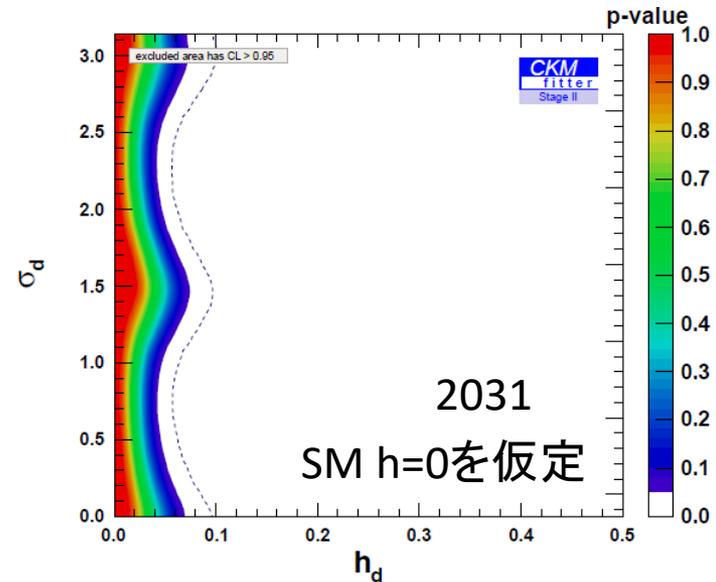
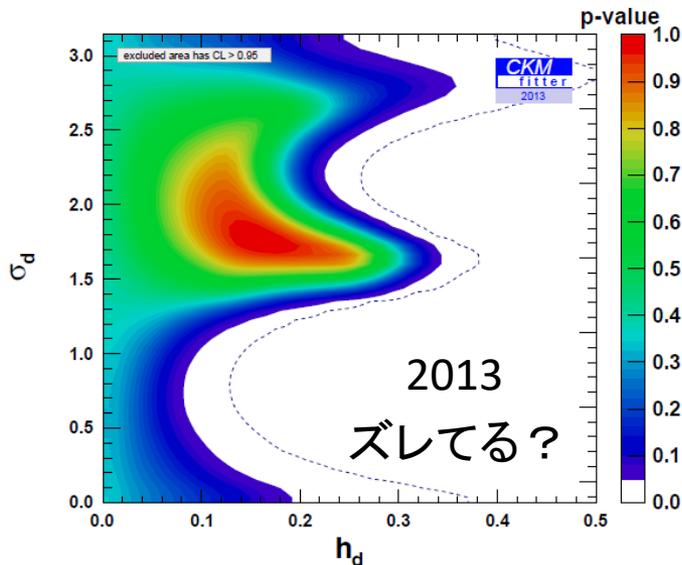
$$h \simeq 1.5 \frac{|C_{ij}|^2 (4\pi)^2}{|\lambda_{ij}^t|^2 G_F \Lambda^2} \simeq \frac{|C_{ij}|^2}{|\lambda_{ij}^t|^2} \left( \frac{4.5 \text{ TeV}}{\Lambda} \right), \quad \lambda_{ij}^t = V_{ti}^* V_{tj}$$

$$\sigma = \arg(C_{ij} \lambda_{ij}^{t*}),$$

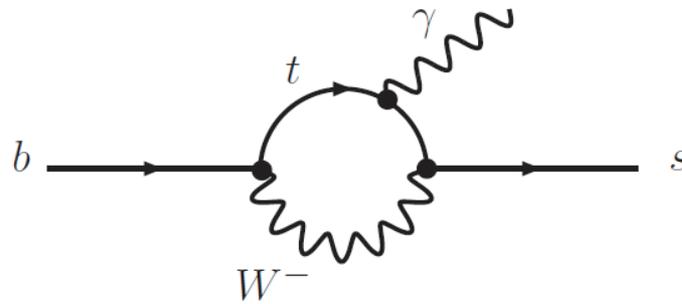
- SUSYだと 10 TeVの新物理スケール
  - $\phi_1$  と  $\Delta m$  に SUSY の影響が現れる

Tanimoto and Yamamoto Phys.Lett. B735 (2014) 426-437

Couplings	NP loop order	Scales (in TeV) probed by	
		$B_d$ mixing	$B_s$ mixing
$ C_{ij}  =  V_{ti} V_{tj}^* $ (CKM-like)	tree level	17	19
	one loop	1.4	1.5
$ C_{ij}  = 1$ (no hierarchy)	tree level	$2 \times 10^3$	$5 \times 10^2$
	one loop	$2 \times 10^2$	40



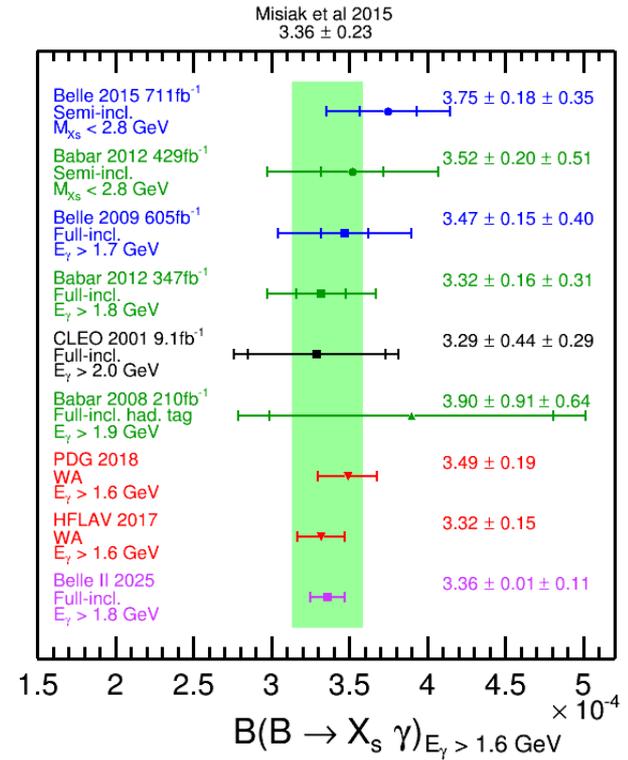
# Penguin での新物理



# BF( $B \rightarrow X_s \gamma$ )

- 実験と理論は良い一致
  - Exp ~5%
  - Theory ~5%
- 実験はすでに系統誤差 dominant だが大量の統計で誤差を 3% にする事が可能
  - WA は 2.6% ぐらい
- 理論の誤差も将来的に 3.5% (2025年) ぐらいに押さえられる

Private communication with M.Misiak

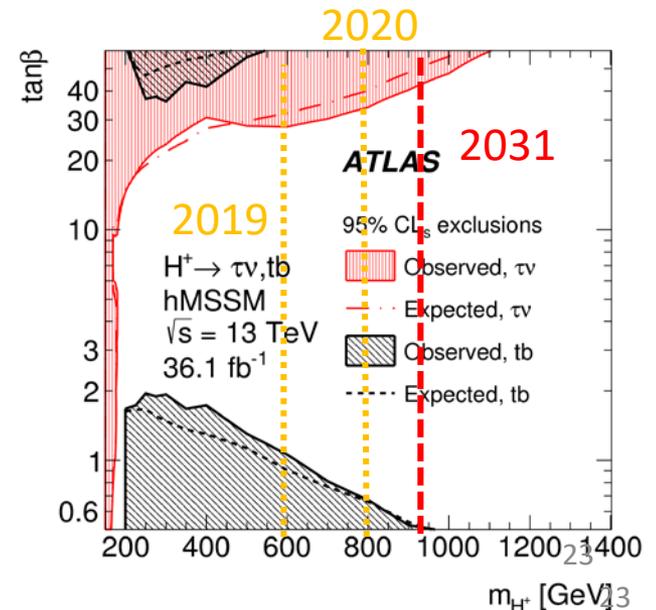


- 新物理スケール
  - 荷電ヒッグス  $M_{H^\pm} > 900 \text{ GeV}$
  - 中間  $\tan\beta$  領域 (~5) は LHC より厳しい制限

Ishikawa private estimate

Observables	Belle 0.71 ab <sup>-1</sup>	Belle II 5 ab <sup>-1</sup>	Belle II 50 ab <sup>-1</sup>
$\text{Br}(B \rightarrow X_s \gamma)_{\text{inc}}^{\text{lep-tag}}$	5.3%	3.9%	3.2%
$\text{Br}(B \rightarrow X_s \gamma)_{\text{inc}}^{\text{had-tag}}$	13%	7.0%	4.2%
$\text{Br}(B \rightarrow X_s \gamma)_{\text{sum-of-ex}}$	10.5%	7.3%	5.7%
$\Delta_{0+}(B \rightarrow X_s \gamma)_{\text{sum-of-ex}}$	2.4%	0.94%	0.69%
$\Delta_{0+}(B \rightarrow X_{s+d} \gamma)_{\text{inc}}^{\text{had-tag}}$	9.0%	2.6%	0.85%

Belle II Physics book 1808.10567



# $\Delta A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)$

- $A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)$  は新物理のCPVに敏感だがすでに理論誤差が主要

$$A_{CP} = \frac{\Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{X}_s \gamma) - \Gamma(B \rightarrow X_s \gamma)}{\Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{X}_s \gamma) + \Gamma(B \rightarrow X_s \gamma)}$$

- 新たな変数  $\Delta A_{CP}$  はSMで0なので新物理に敏感

$$\begin{aligned} \Delta A_{CP} &= A_{CP}(B^+ \rightarrow X_s^+ \gamma) - A_{CP}(B^0 \rightarrow X_s^0 \gamma) \\ &= 4\pi^2 \alpha_s \frac{\tilde{\Lambda}_{78}}{m_b} \text{Im} \left( \frac{C_8}{C_7} \right), \\ &\approx 0.12 \left( \frac{\tilde{\Lambda}_{78}}{100 \text{ MeV}} \right) \text{Im} \left( \frac{C_8}{C_7} \right), \end{aligned}$$

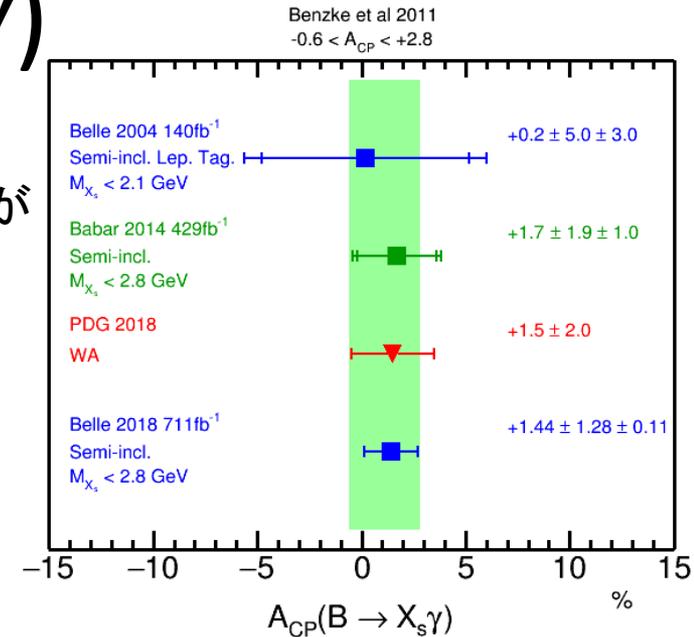
M. Benzke, S. J. Lee, M. Neubert, G. Paz, JHEP 08 (2010) 099

- Ex. SUSY with flavor violating trilinear couplings

M. Endo, T. Goto, T. Kitahara, S. Mishima, D. Ueda and K. Yamamoto, JHEP 04 (2018) 019.

- Belle で初の測定 2018

- 主要な系統誤差は減らせる → Belle II でさらに改善出来る

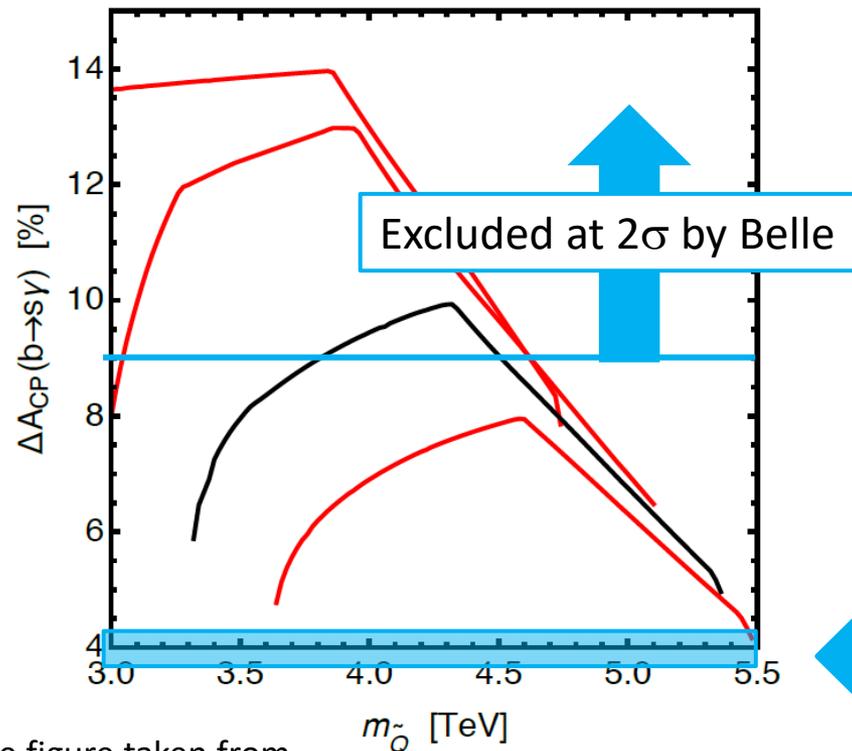


$$\Delta A_{CP} = [ +3.69 \pm 2.65(\text{stat.}) \pm 0.76(\text{systr.}) ] \% \quad \text{Watanuki, Ishikawa et al, PRD 99, 032012 (2019)}$$

Observables	Belle 0.71 ab <sup>-1</sup>	Belle II 5 ab <sup>-1</sup>	Belle II 50 ab <sup>-1</sup>
$\Delta A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)_{\text{sum-of-ex}}$	2.7%	0.98%	0.30%

# $\Delta A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)$ による SUSY への制限

- Set a limit on parameter space in SUSY
  - Squark 4.5 TeV 以下の parameter space に制限



Lines overlaid onto the figure taken from M. Endo, T. Goto, T. Kitahara, S. Mishima, D. Ueda and K. Yamamoto, JHEP 04 (2018) 019.

Glino mediated EWP which explains  $\varepsilon'/\varepsilon$  from CPV trilinear couplings

# $\Delta A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)$ と電弱バリオジェネシス

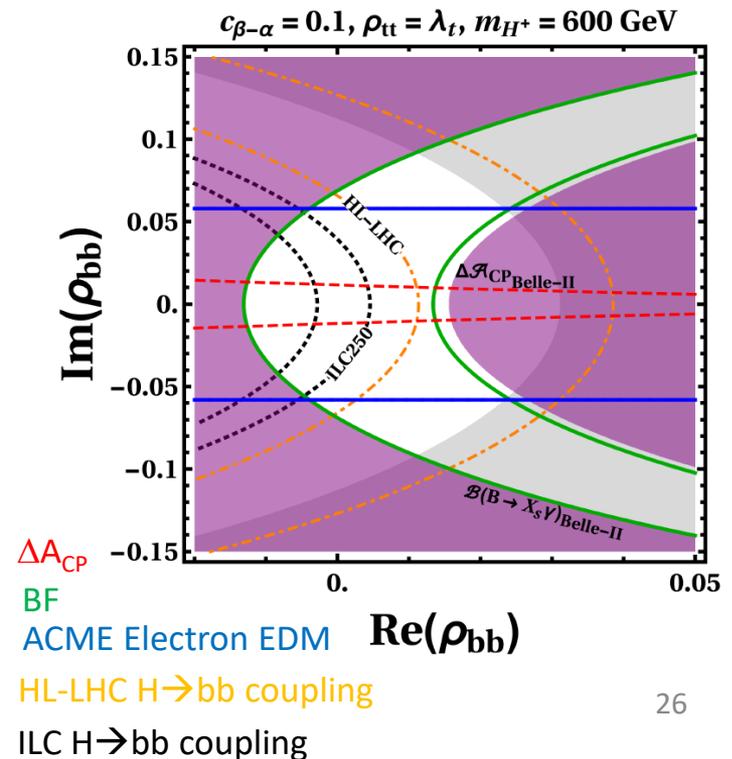
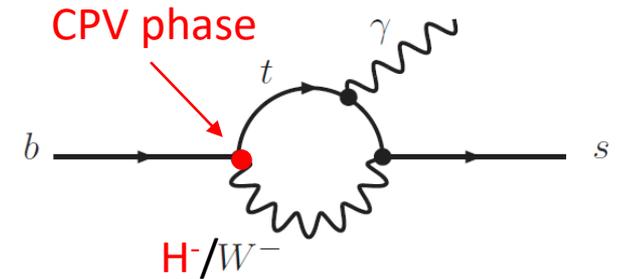
- General 2HDM (no  $Z_2$  symmetry)では additional な湯川結合  $\rho$  aが導入

$$y_{hij}^f = \frac{\lambda_i^f}{\sqrt{2}} \delta_{ij} s_{\beta-\alpha} + \frac{\rho_{ij}^f}{\sqrt{2}} c_{\beta-\alpha},$$

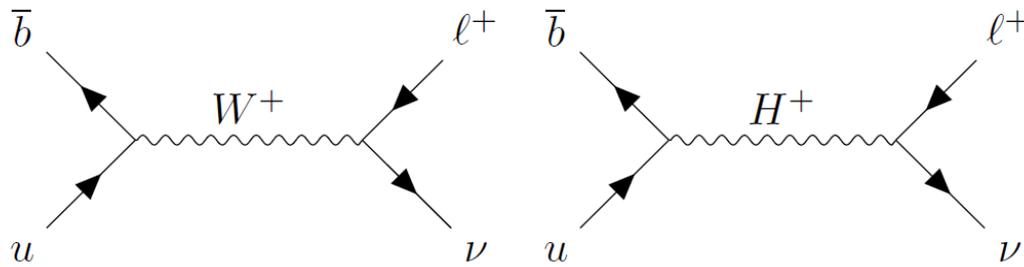
$$y_{Hij}^f = \frac{\lambda_i^f}{\sqrt{2}} \delta_{ij} c_{\beta-\alpha} - \frac{\rho_{ij}^f}{\sqrt{2}} s_{\beta-\alpha},$$

$$y_{Aij}^f = \mp \frac{i\rho_{ij}^f}{\sqrt{2}},$$

- もし  $\rho$  が複素数であれば CPV と EW Baryogenesis が可能
- $\Delta A_{CP}$  は  $\rho$  の位相に敏感
- HL-LHC/ILC での  $H \rightarrow bb$  による湯川結合の測定により  $\rho$  に制限を与える
  - もし  $\rho$  の位相を見つけたら ILC500 での自己結合測定



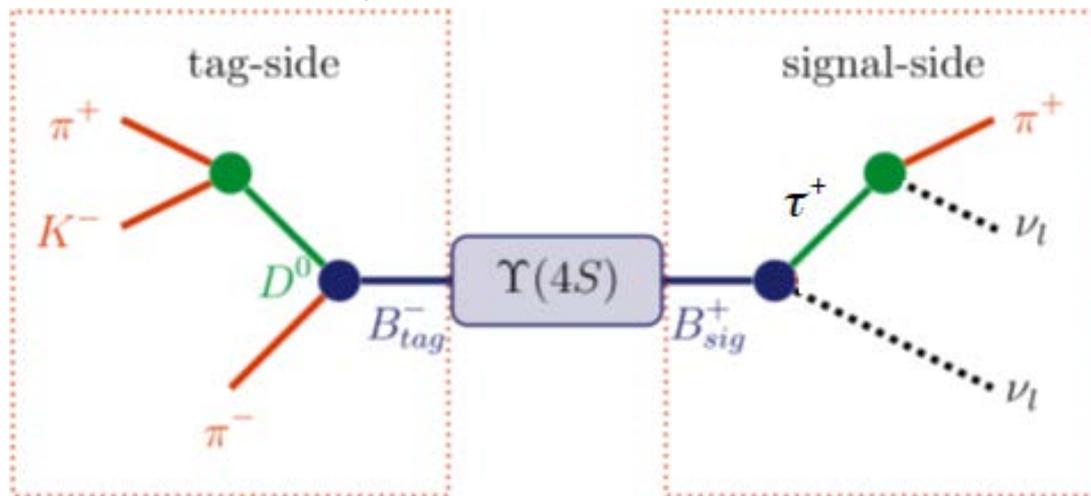
# ツリー : Leptonic Decay



# B Decays with Multiple $\nu$

- 複数のニュートリノを放出する過程では 逆側のBを再構成する必要がある
- 複数のニュートリノを放出する解析は LHCb では難しい
  - $B \rightarrow D\tau\nu$ ,  $B \rightarrow \tau\nu$ ,  $b \rightarrow s\nu\nu$ ,  $b \rightarrow s\tau\tau$
- Three tagging methods
  - Inclusive tag
  - Semileptonic B tag
  - Hadronic B tag

↑ Efficiencyが良い  
↓ Purityが良い



# B → τν 荷電ヒッグス探索

- BF(B → τν) in 2HDM type-II  $r_H = (1 - \frac{m_B^2}{m_H^2} \tan^2 \beta)^2$

– Higgs coupling  $\propto m_\tau$

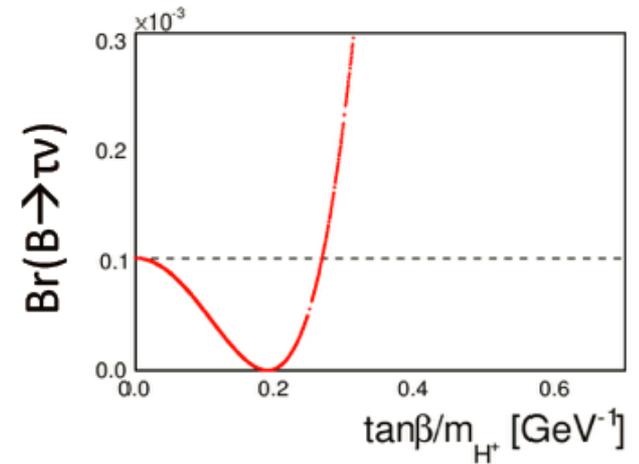
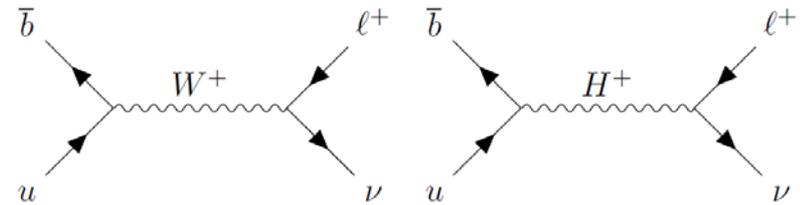
$$\mathcal{B}(B \rightarrow \tau\nu) = \mathcal{B}(B \rightarrow \tau\nu)_{SM} \times r_H$$

– BF は  $r_H$  にしかよらない ( $\tan\beta/m_H$  の関数)

–  $r_H$  はレプトンフレーバーによらない (B → μν)

- よるようであれば LFU Violation の発見

- BF を精密測定することにより荷電ヒッグス探索



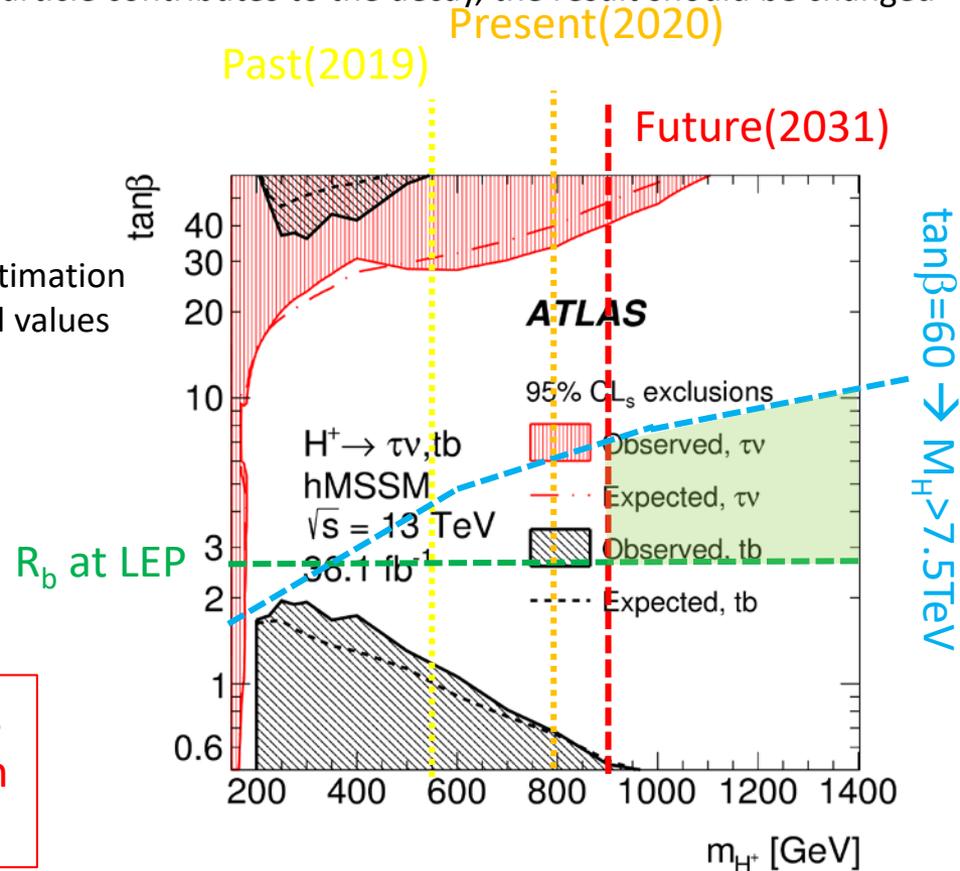
	Integrated Luminosity (ab <sup>-1</sup> )	1	5	50
hadronic tag	statistical uncertainty (%)	29	13	4
	systematic uncertainty (%)	13	7	5
	total uncertainty (%)	32	15	6
	statistical uncertainty (%)	19	8	3
semileptonic tag	systematic uncertainty (%)	18	9	5
	total uncertainty (%)	26	12	5

# Limit on Charged Higgs

- $R_b$  at LEP
  - $\tan\beta > \sim 2.5$
- $BF(B \rightarrow Xs \gamma)$ 
  - $M_H > 580 \text{ GeV}$  (2019)
  - $M_H > 800 \text{ GeV}$  (2020)
  - $\rightarrow > \sim 900 \text{ GeV}$  in 2031 Ishikawa's private estimation  
Assuming SM central values
- $BF(B \rightarrow \tau\nu)$  in 2027
  - $\tan\beta/M_H < 0.008/\text{GeV}$  (4% on BF)
  - If  $\tan\beta=60 \rightarrow M_H > 7.5 \text{ TeV}$
- Allowed region in 2031

For  $B \rightarrow Xs\gamma$  case, 2HDM type-II is assumed

If SUSY particle contributes to the decay, the result should be changed

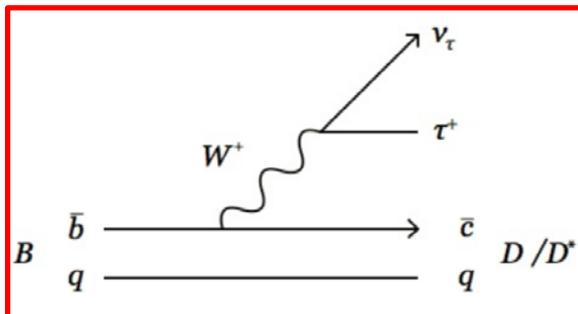


ILC で Higgs couplings を測定するまでは、  
B physics observables が charged Higgs in  
2HDM type-II で最も強い制限を与える

# 現在アノマリーのあるモード

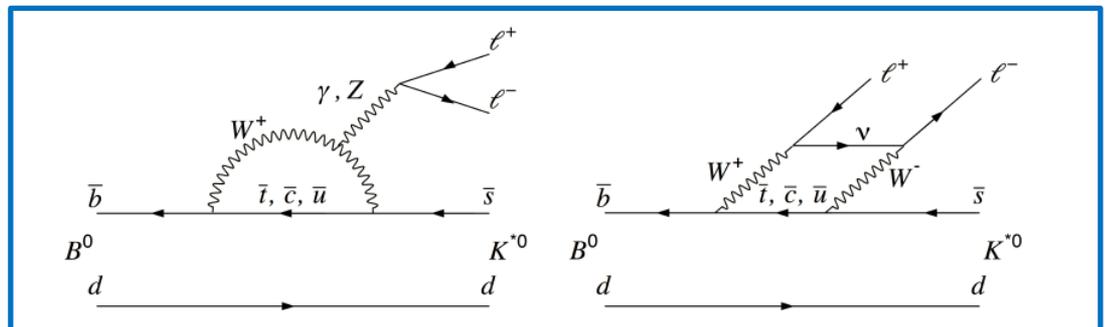
- 二つの Lepton Flavor Universality Violation アノマリーがある
  - Anomaly in  $b \rightarrow c \tau \nu$  by LHCb and Babar.
    - Belle が最も精密だがSMとも LHCb+Babar とも 2s程度でconsistent
  - Anomaly in  $b \rightarrow s l^+ l^-$  by LHCb
- 標準模型ではLFUVは無い
  - 最近 LHC で  $W \rightarrow \tau \nu, \mu \nu$  のアノマリーが消えた

$b \rightarrow c \tau \nu$



Tree  
BF $\sim$ O( $10^{-2}$ )

$b \rightarrow s l^+ l^-$

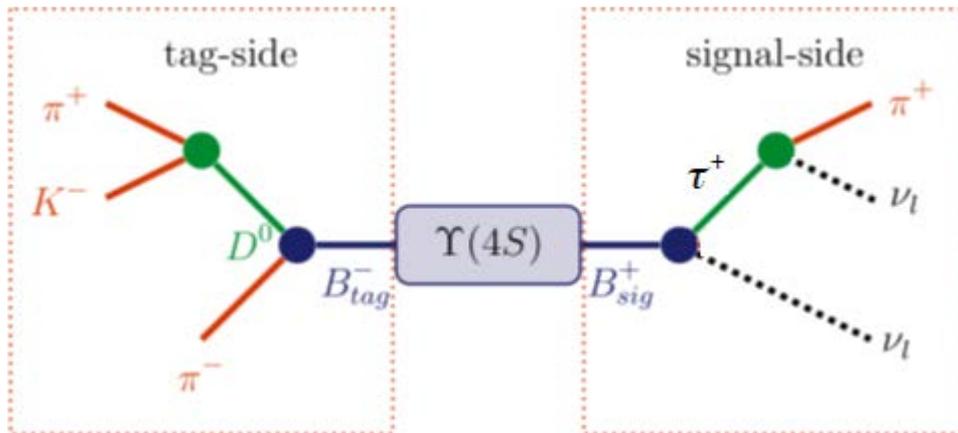
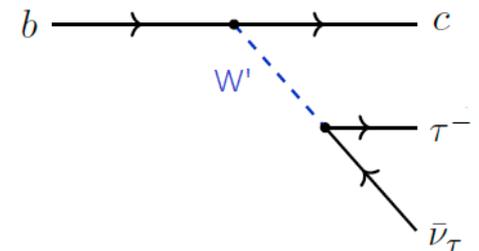
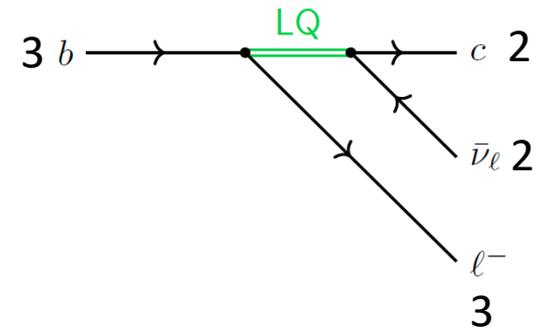
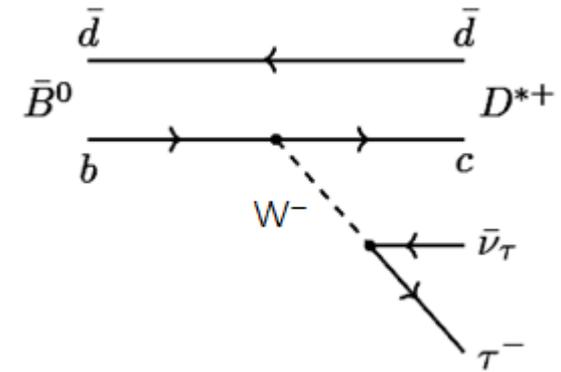


Loop  
BF $\sim$ O( $10^{-6}$ )

# $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$

- 標準模型では  $W$  を介して崩壊
  - 崩壊分岐比は  $O(1)\%$  と大きい
- 第三世代クォークから第三世代レプトンへの崩壊
  - 重い粒子に結合しやすい新物理
    - charged Higgs
  - 第三世代を特別に扱う新物理
    - Leptoquark, flavored  $Z'$
- $b \rightarrow c \tau \nu$  first observed by Belle
 

Matyja et al. PRL 99, 191807 (2007), arXiv:0706.4429
- 終状態に二つ以上のニュートリノがあるため、逆側の  $B$  中間子を再構成 (tag) しなくてはならない
  - $\tau \rightarrow \mu \nu \nu, \tau \rightarrow \pi \nu$

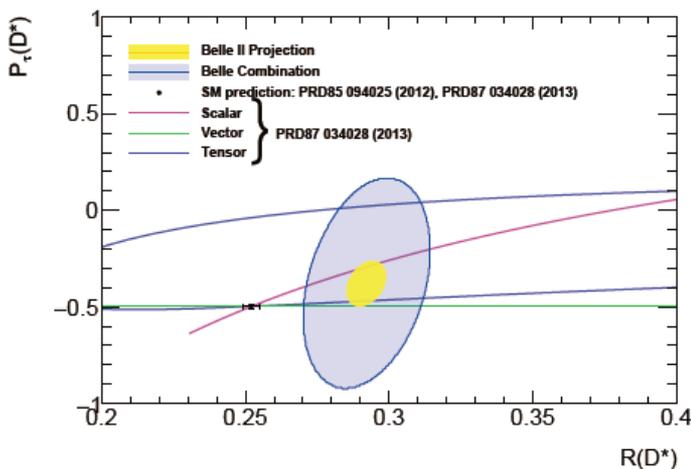


# $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$

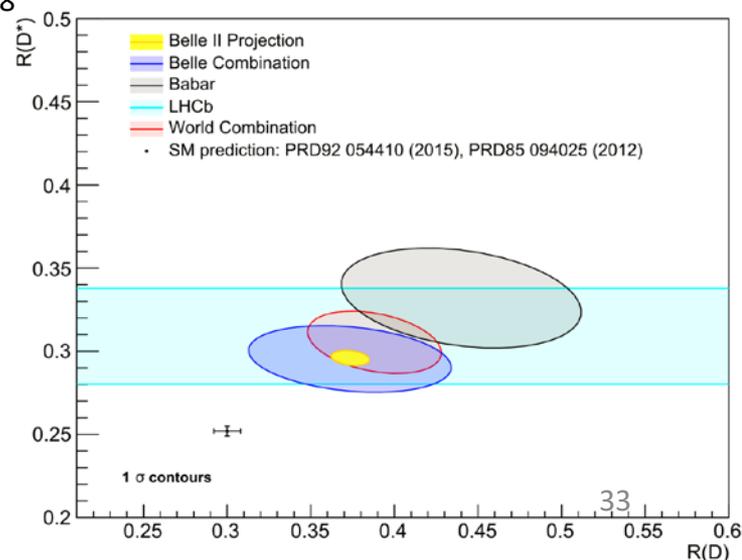
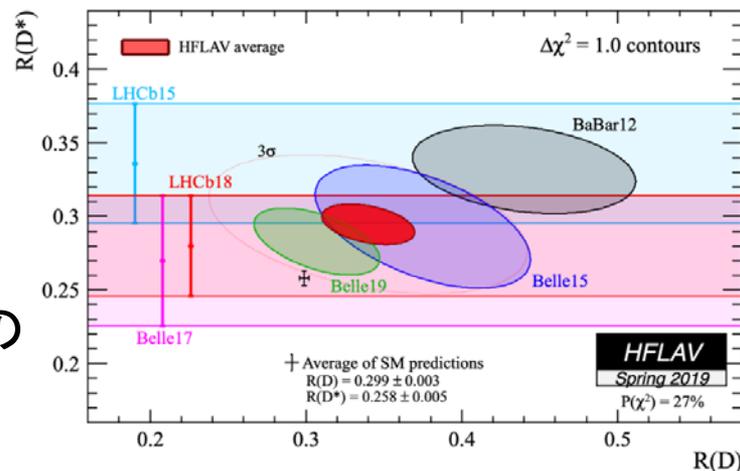
- $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$  で  $3.9\sigma$  のアノマリーが見えている

$$R(D^{(*)}) = \frac{\text{BF}(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu_\tau)}{\text{BF}(B \rightarrow D^{(*)} l \nu_l)} \quad \text{15\%のズレ}$$

- Leptoquark や flavorfull  $W'$  などの新物理
- WAの中心値が変わらなければ、2024年までのデータでアノマリーを発見できる。
- アノマリーが発見された後には  $D^*$  と  $\tau$  の偏極も含めた新物理模型の選別 Tanaka and Watanabe 1212.1878

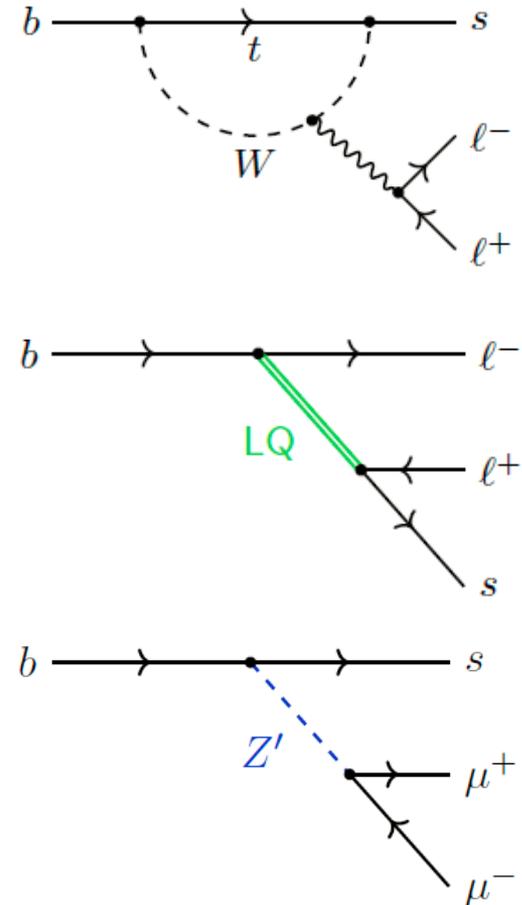


	$5 \text{ ab}^{-1}$	$50 \text{ ab}^{-1}$
$R_D$	$(\pm 6.0 \pm 3.9)\%$	$(\pm 2.0 \pm 2.5)\%$
$R_{D^*}$	$(\pm 3.0 \pm 2.5)\%$	$(\pm 1.0 \pm 2.0)\%$
$P_\tau(D^*)$	$\pm 0.18 \pm 0.08$	$\pm 0.06 \pm 0.04$

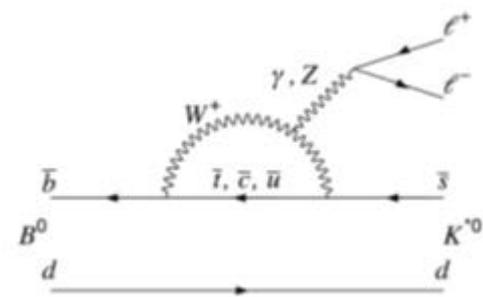


# $b \rightarrow s |^+ |^-$

- SMでは loop diagram で崩壊
  - 崩壊分岐比は  $O(10^{-6})$  と小さい
  - Loop と CKM matrix element  $V_{ts} \sim A\lambda^2$  で suppress
- $B \rightarrow K^{(*)} |^+ |^-$  first observed by Belle
  - K. Abe et al, PRL 88, 021801 (2002), [hep-ex:0109026](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0109026)
  - A. Ishikawa et al, PRL 91, 261601 (2003), [hep-ex/0308044](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0308044)
- Color singlet の Lepton が終状態にあるので理論的・実験的にクリーンとされている
  - しかし precision era になると、その理論的なクリーンさの定量的理解が重要
  - LFUはQED correction を考えてもクリーン 1% ほどの誤差
- 新物理
  - 新粒子が loop を回る
    - SUSY, charged Higgs
  - Tree level FCNC
    - Leptoquark
    - Flavored  $Z'$



# $b \rightarrow s l^+ l^-$ での Lepton Flavor Universality



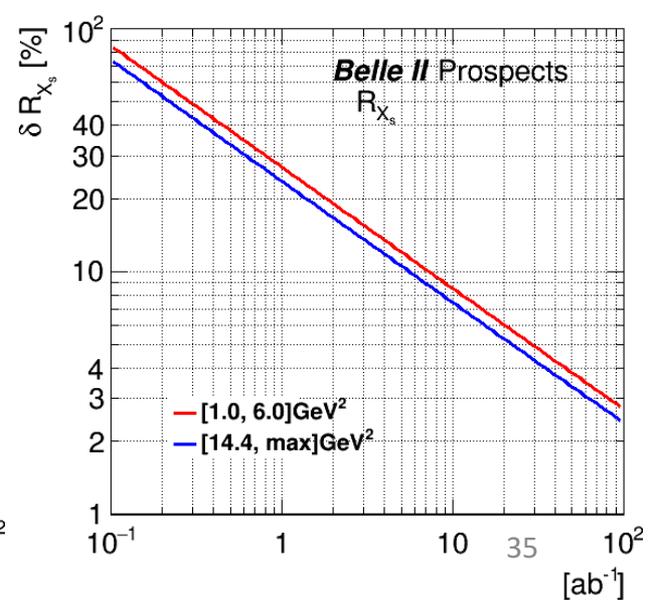
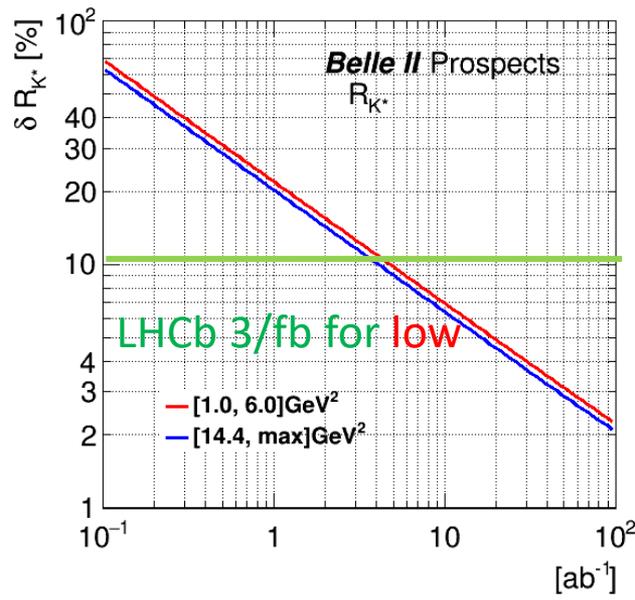
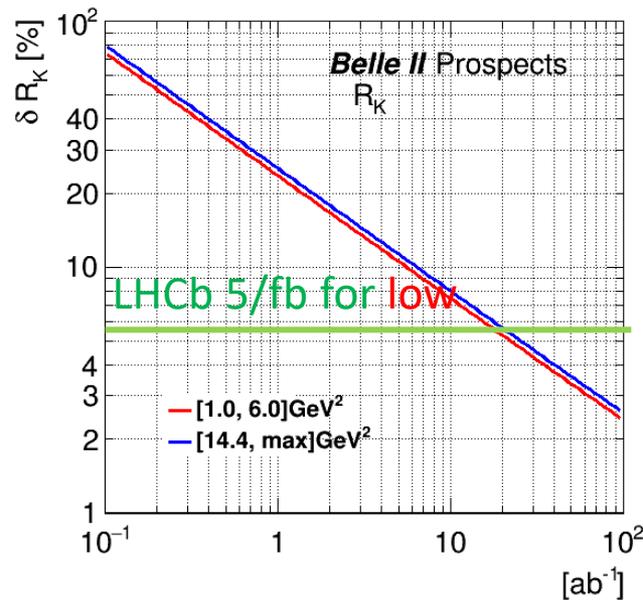
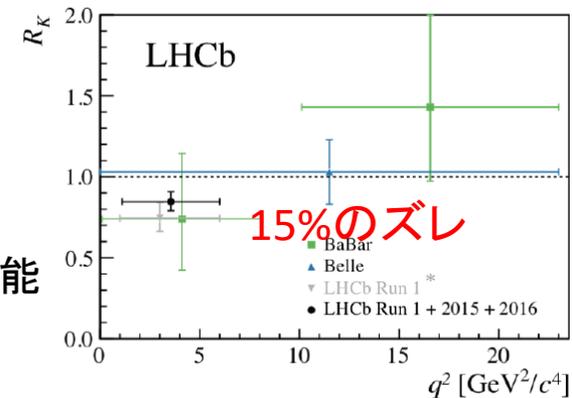
- LHCb で  $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$  の LFU でアノマリー

- Naive な平均を取ると  $4\sigma$  程度

$$R_H = \frac{B(B \rightarrow H \mu^+ \mu^-)}{B(B \rightarrow H e^+ e^-)} \quad H = K, K^*, X_s, \dots$$

- Belle II

- LHCb ではできない high  $q^2$  や Inclusive  $B \rightarrow X_s l^+ l^-$  での測定が可能
- 現在の中心値が変わらなければ 2025年に新物理の発見
- その後は角分布における LFU 測定による模型選別



# 現在と将来の困難と解決法

- 背景事象
- 理論計算(QCD)
  
- COVID-19

# 困難：背景事象が多い

● 背景事象によりSuperKEKBの電流が制限されルミノシティが上げられない

ー 現在はTOPのhit rateで制限

- 主な背景事象は beam-gas interaction
- Hit rateが高いと出力電荷が増え光電面が悪化する
- 複数種類のMCP-PMTを使っているがConventionalなMCP-PMTが問題
- 将来的に寿命改善型に入れ替えはするが、そこまで持たせないといけない

ー 次はCDCの電流

- 何度も増幅しているとワイヤーに不純物(炭素?シリコン?)がつき放電

● 背景事象により動かなくなる、もしくは検出効率やMCとの合いが悪化

ー PXD

- Synchrotron radiationによる背景事象。
- Occupancyが3%を超えるとdata lostする。
- 放射線耐性??

ー SVD

- Occupancy for layer3

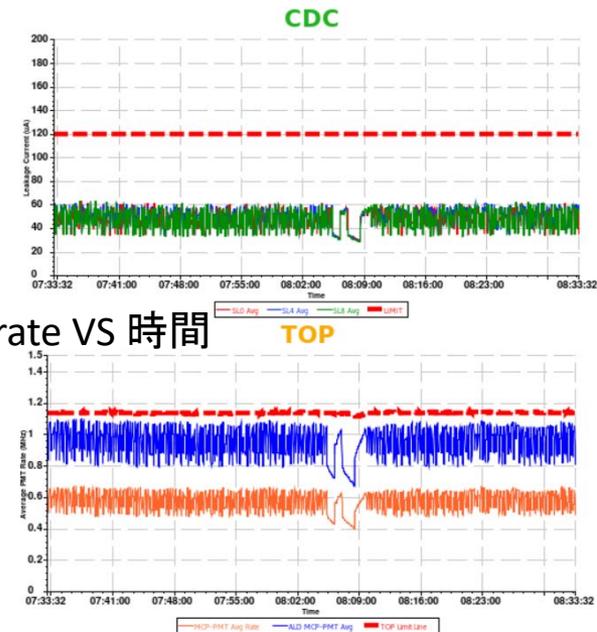
ー ECL

- 大量のLow energyのphotonがbackward endcap領域に当たるため、low energy photonを使った解析が困難

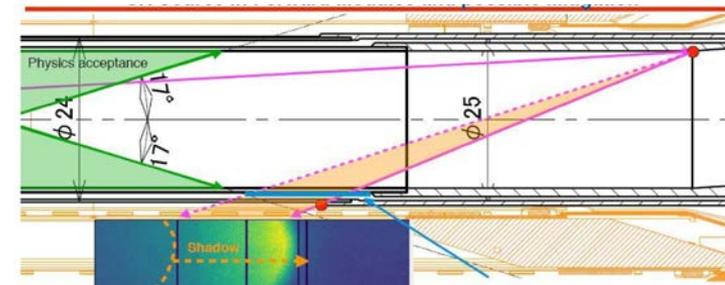
ー KLM

- Glass RPC 沈黙

TOP/CDC rate VS 時間

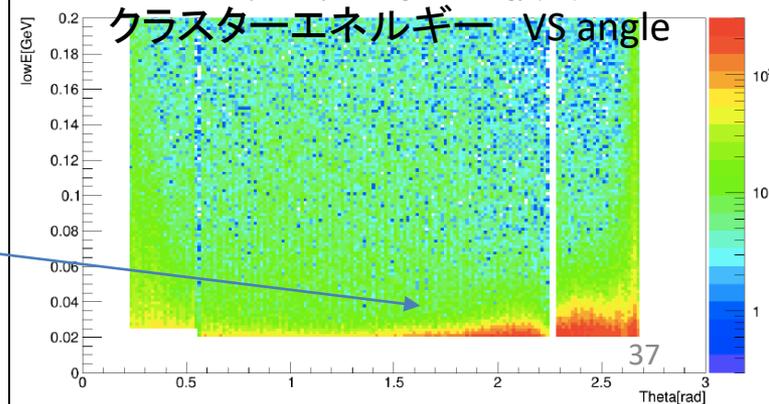


超前方のビームパイプ SR scattering



soft photon polar angle vs energy (RD)

クラスターエネルギー VS angle

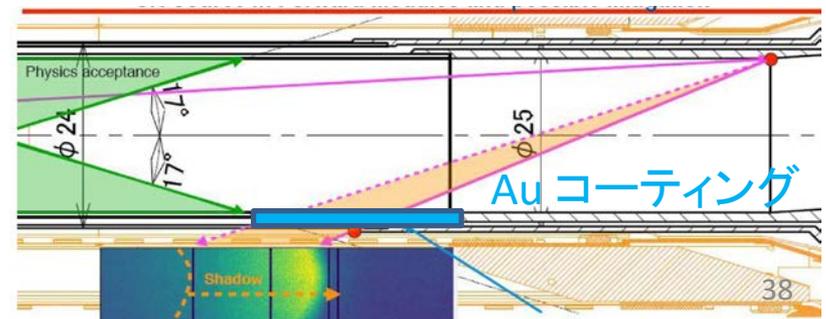
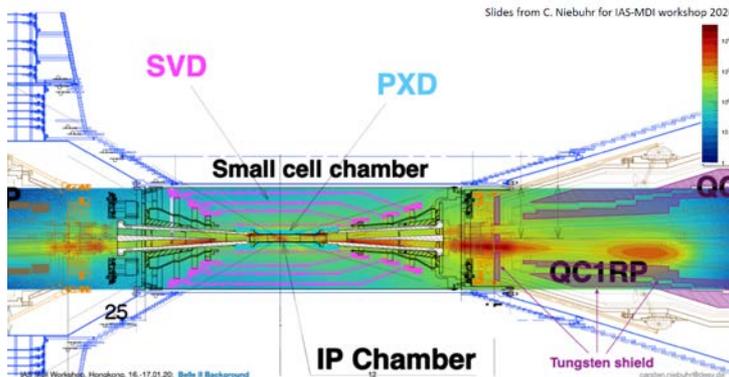
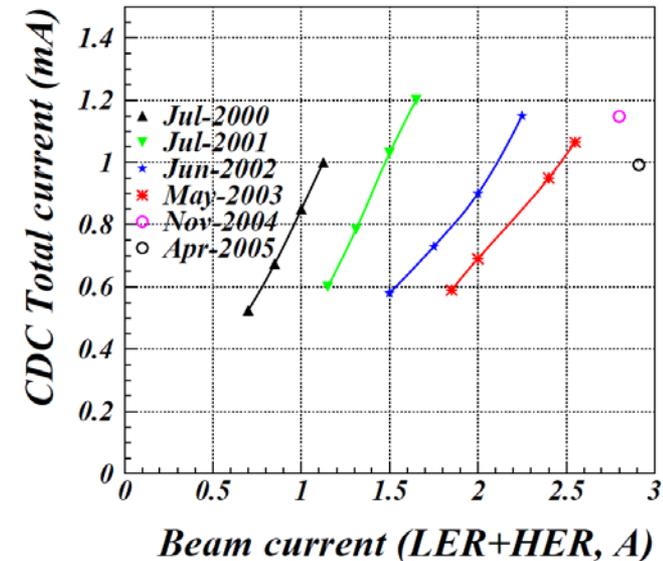


# 解決法：背景事象が多い

- 加速器・MDI で出来る事
  - KEKBからビームパイプを交換したため**真空の焼き出し**がまだ済んでいない
    - 真空の焼き出しは数年かかる
    - 時間が解決(大電流で長時間 Ahが重要)
  - コリメータの追加
    - Touschek (bunch内の粒子間の相互作用)
    - 予定されていた全てインストールされていない
  - Bellows周りはシールドが無い
    - シールドを設置 and/or Bellows を変更して入れ替える
  - PXD に対する**back scattered SR background**
    - ビームパイプ超前方にも **Au コーティング**

Belle 1 CDC  
電流が3倍になっても  
真空の改善で rate は同じ

*CDC current vs Beam current*



# 解決法：背景事象が多い

空間・時間的に細かく分割

- 検出器入れ替えで解決

- PXD

- DEPFET → 高速な SOI, DMAPS

- SVD

- Strip pitch を Belle 1 程度に狭くする
    - CDC 領域もカバーする？

- CDC

- ガスを変えたり cell を小さくしても難しい??
    - Full silicon tracker が良い? ← 物質質量,  $dE/dx$  による PID

- TOP/ARICH

- PMT → MPPC

- ECL

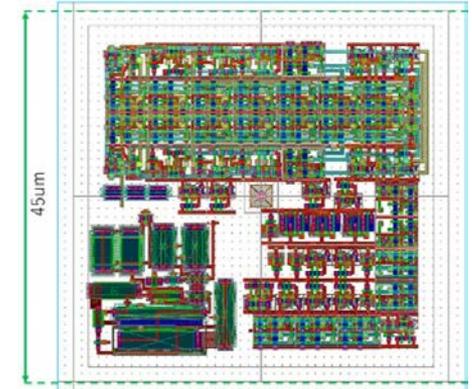
- CsI(Tl) → 高速な pure CsI or 他のクリスタル(LYSOは高いが rad. length 長く嬉しい)

- KLM

- Glass RPC → シンチ+MPPC

New Pixel Detector Concept DuTiP for Belle II  
Upgrade and the ILC with an SOI Technology

Akimasa Ishikawa<sup>a,b,\*</sup>, Yasuo Arai<sup>a,b</sup>, Jérôme Baudot<sup>c</sup>, Junji Haba<sup>a,b</sup>,  
Maciej Kachel<sup>c</sup>, Ikuo Kurachi<sup>a</sup>, Taohan Li<sup>d</sup>, Shun Ono<sup>a</sup>,  
Takehiro Takayanagi<sup>a</sup>, Ayaki Takeda<sup>e</sup>, Toru Tsuboyama<sup>a,b</sup>, Miho Yamada<sup>f</sup>



# 困難：理論計算(QCD)

- B中間子崩壊の現象論の計算は比較的精度が良く信頼出来る。
- しかし、Belle IIレベルの測定になるとすでに理論誤差がリミットするところが出てくる。
  - 場合によっては Belle の精度でもすでに理論誤差がリミットしている

# 解決法：理論の計算(QCD)

- 解決法

- 実験的に決められる量は実験で決める
  - 理論の仮定が必要でモデルによる物もある
- Lattice QCD で計算できるものはそれで決める
  - 可能であれば現象論と組み合わせる
  - Bは重いので高速なスパコンが必要
- (現象論屋さんが頑張る)

- 例として

- $B(B \rightarrow Xs\gamma)$
- $\phi_1$
- $|V_{ub}|$

# 解決法：理論の計算(QCD)

- Belle 1 で 解決出来た例 :  $B(B \rightarrow X_s \gamma)$

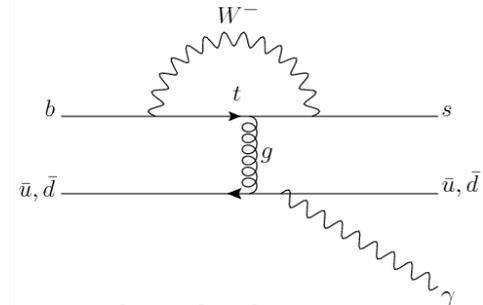
- 理論誤差 **7%** in 2018 ( $m_{H^+} > 580 \text{ GeV}$ )

- 理論誤差は  $b \rightarrow sg$  の gluon が spectator に吸収されて photon を放出し  $b \rightarrow s \gamma$  に見える事象 (**resolved photon**) が大きかった (5%)。
- EM なので spectator の charge に依存  $\rightarrow$  isospin asymmetry を測定するとその大きさが分かる

S. J. Lee, M. Neubert, G. Paz, PRD **75**, 114005 (2007).

M. Misiak, Acta Phys. Polon. B **40**, 2987 (2009)

M. Benzke, S. J. Lee, M. Neubert, G. Paz, JHEP 08 (2010) 099



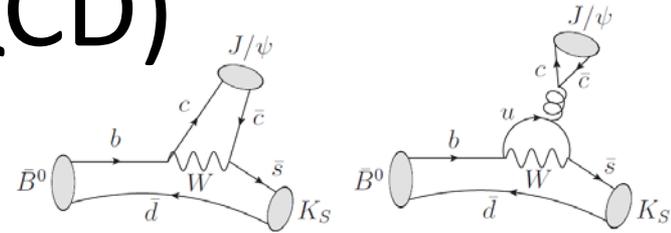
- Belle で測定し isospin asymmetry が 0 consistent  $\rightarrow$  resolved photon の影響による誤差は小さい (3%)

Watanuki, Ishikawa et al, PRD 99, 032012 (2019)

- 理論誤差 **5%** と改善された ( $m_{H^+} > 800 \text{ GeV}$ )

$$\mathcal{B} = (3.40 \pm 0.17) \times 10^{-4}$$

# 解決法：理論の計算(QCD)



- $\phi_1$  with  $B \rightarrow J/\psi K_s$

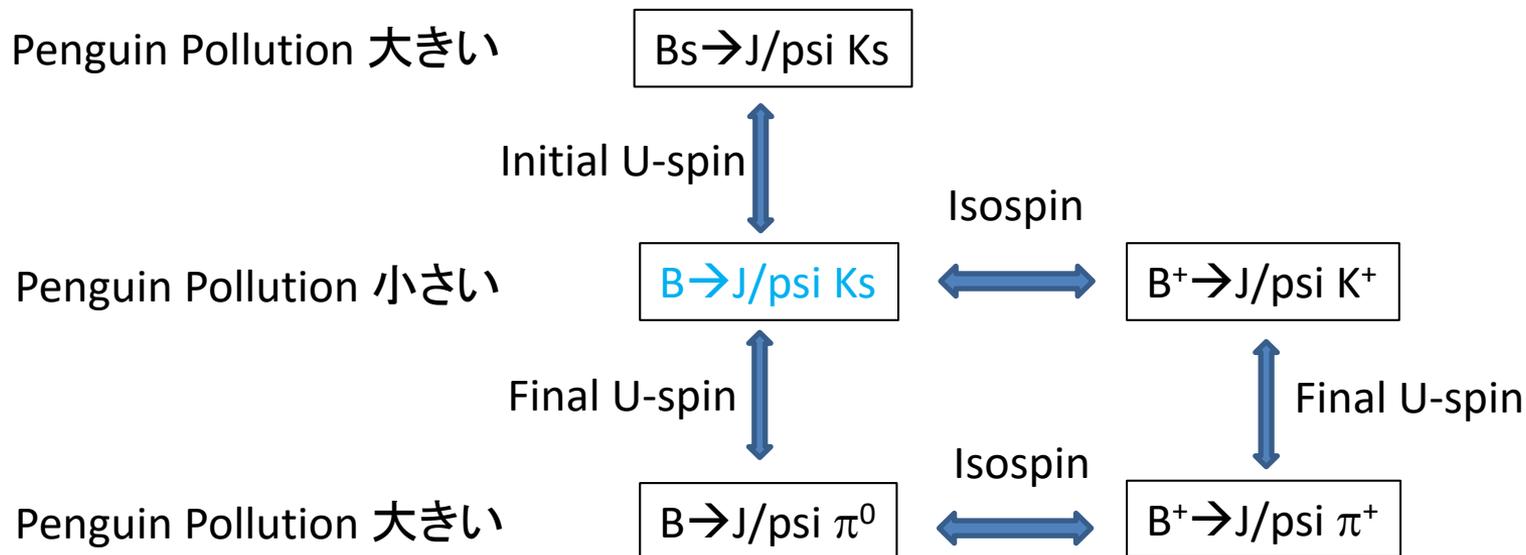
- Penguin pollution による理論誤差が1度ぐらいあるかも (実験誤差0.9度)

- $b \rightarrow s$  (ccbar) penguin

$$S_{J/\psi K_s^0} \equiv \sin \phi_d + \Delta S_{J/\psi K_s^0} \equiv \sin(\phi_d + \delta \phi_{J/\psi K_s^0})$$

- 関連するモード(Isospin symmetry, SU(3) symmetry, U-spin symmetry)のisospin asymmetry,  $A_{CP}$ ,  $S_{CP}$ などの測定を行い、その影響を評価。

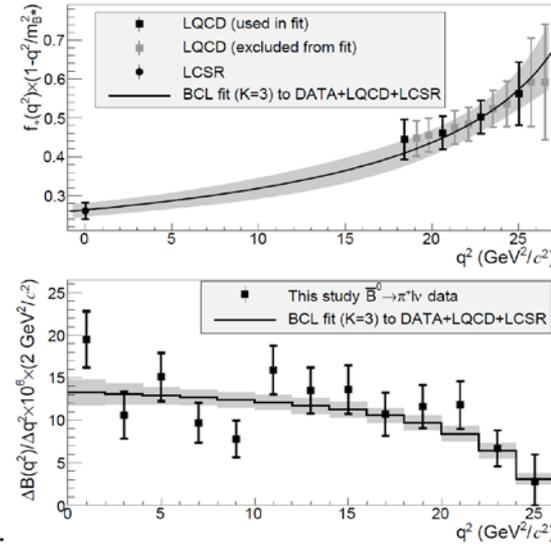
- Penguin pollutionが大きな  $b \rightarrow d$  (ccbar) を測定し、 $b \rightarrow s$  (ccbar) を見積もる(model 依存)



# 解決法：理論の計算(QCD)

- $|V_{ub}|$

- $d\mathcal{B}(B \rightarrow \pi l \nu)/dq^2$  が best な測定方法だが、Belle 1 の時点ですでに **Lattice QCD**による form factor の精度で limit
- スパコンの計算力アップと **Lattice QCD**屋さんの努力により、**Lattice QCD** の計算精度を上げる
  - High  $q^2$  での計算なので low  $q^2$  は現象論の予言と接続する



$X_u$	Theory	$q^2$ GeV/c <sup>2</sup>	$N^{\text{fit}}$	$N^{\text{MC}}$	$\Delta\mathcal{B}$ 10 <sup>-4</sup>	$\Delta\zeta$ ps <sup>-1</sup>	$ V_{ub} $ 10 <sup>-3</sup>
$\pi^+$	LCSR [33]	< 12	247.2 ± 18.9	233.1	0.808 ± 0.062	4.59 <sup>+1.00</sup> <sub>-0.85</sub>	3.40 ± 0.13 ± 0.09 <sup>+0.37</sup> <sub>-0.32</sub>
	LCSR [34]	< 16	324.2 ± 22.6	305.1	1.057 ± 0.074	5.44 <sup>+1.43</sup> <sub>-1.43</sub>	3.58 ± 0.12 ± 0.09 <sup>+0.59</sup> <sub>-0.39</sub>
	HPQCD [35]	> 16	141.3 ± 16.0	116.1	0.445 ± 0.050	2.02 <sup>+0.55</sup> <sub>-0.55</sub>	3.81 ± 0.22 ± 0.10 <sup>+0.66</sup> <sub>-0.43</sub>
	FNAL [36]	> 16	141.3 ± 16.0	116.1	0.445 ± 0.050	2.21 <sup>+0.47</sup> <sub>-0.42</sub>	3.64 ± 0.21 ± 0.09 <sup>+0.40</sup> <sub>-0.33</sub>

Lattice QCDの誤差

言い方を変えると Belle 1 の時代に **Lattice QCD** がBの物理に使えるようになった。  
 Belle II では **Lattice QCD** の華々しい活躍を期待しています。

Inclusive  $b \rightarrow c, u$  や  $|V_{td}|$  や  $|V_{ts}|$  もLattice QCD に期待 (bag param. and decay const.)

# まとめ

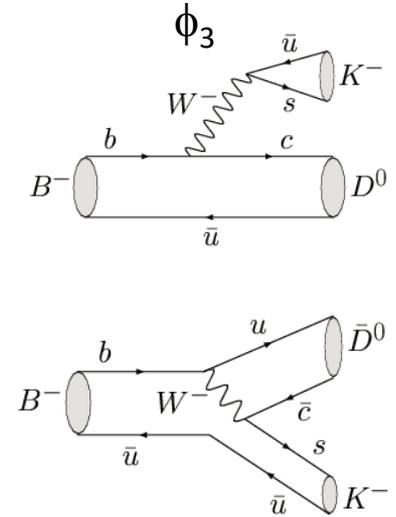
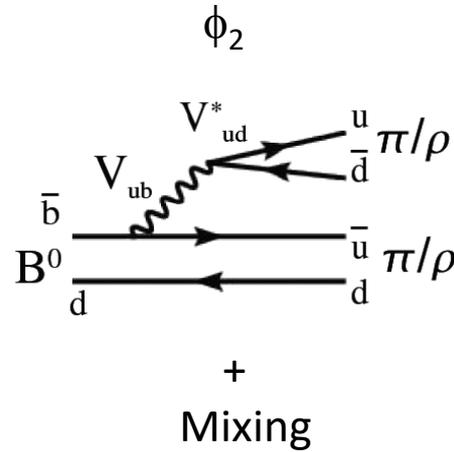
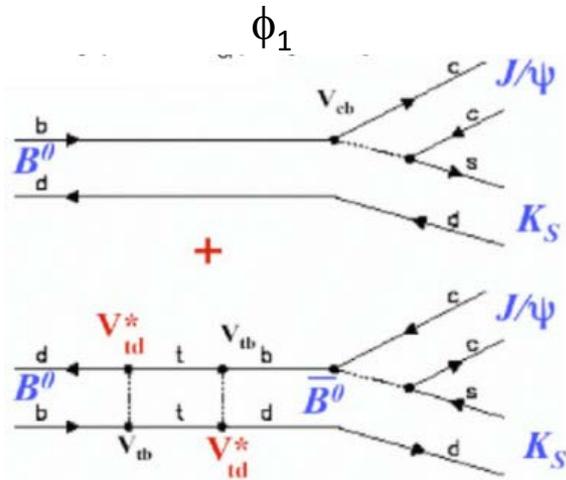
- 現在のBの物理は TeV スケールにある新物理を探索し、消えた反物質の謎の解明が主な目的
  - $M_{\text{SUSY}} > \sim 10\text{TeV}$  using mixing
  - $M_{H^+} > 900\text{GeV}$  with  $\tan\beta \sim 5$
  - $M_{H^+} > 7.5\text{TeV}$  with  $\tan\beta = 60$
  - 電弱バリオジェネシスに必要な phase 探索
- そのためにはもの凄い加速器 SuperKEKB と素晴らしい検出器だけで無く、現象論や Lattice QCD の進展も重要
- 興味のある方は Belle II への参加をお待ちしております。
  - Bの物理だけではなく他の目的でも。



backup

# 角の測定

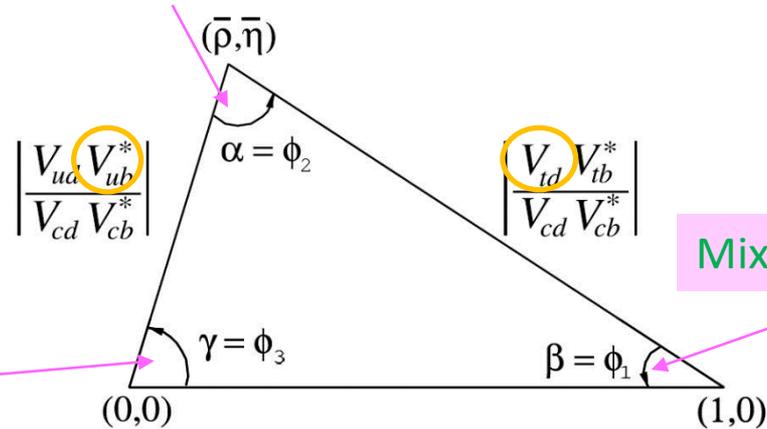
- CPV の測定



Mixing +  $B \rightarrow \pi\pi, \rho\pi, \rho\rho$

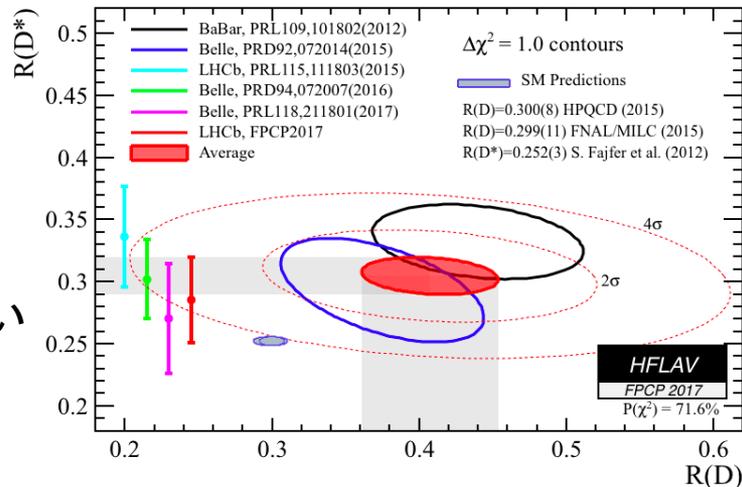
Mixing +  $B \rightarrow J/\psi Ks$

$B \rightarrow DK$

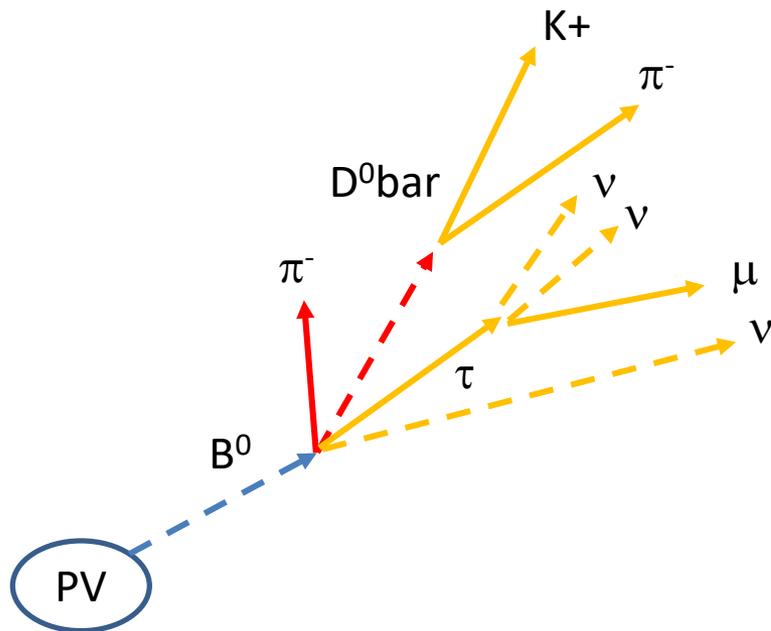


# B → Dτν @ LHCb

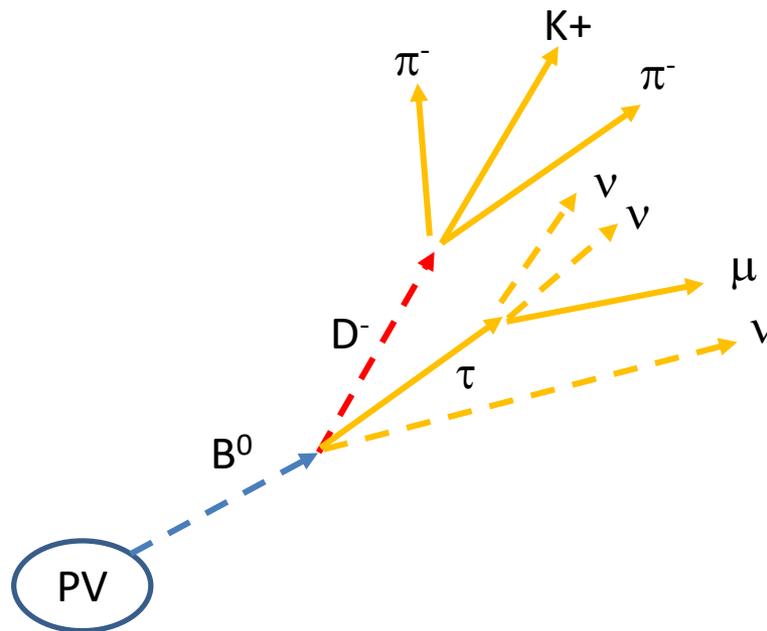
- B中間子の崩壊点がわからない崩壊は測定が非常に難しい
  - 崩壊点の測定には少なくとも**2本の飛跡**が必要
  - 崩壊点がPVから離れている事を要求し背景事象を抑制
- B → Dτν, B<sub>s</sub> → D<sub>s</sub><sup>(\*)</sup>τνは難しいのでは無いか?
  - ただBFがO(1)%なので、出来る可能性もあるか?
- しかしB<sub>c</sub> → J/ψ τνが出来る
  - FF?? Lattice?



個人の意見です



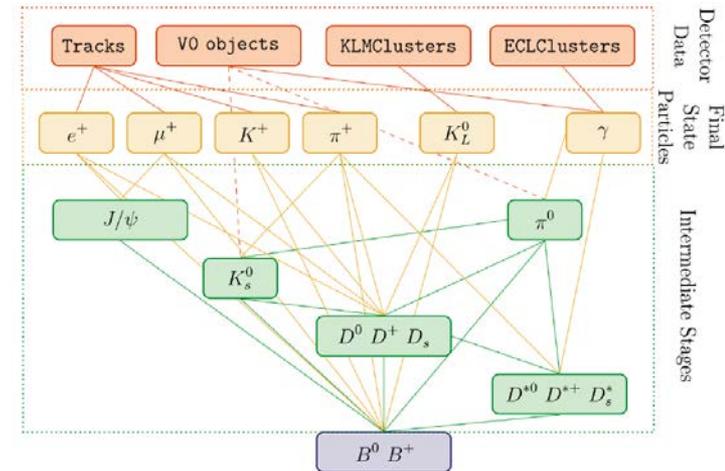
B<sup>0</sup> → D<sup>\*</sup>τν : **2本**あるのでOK



B<sup>0</sup> → Dτν : **1本**しか無いので難しい。  
(3prong τ?)

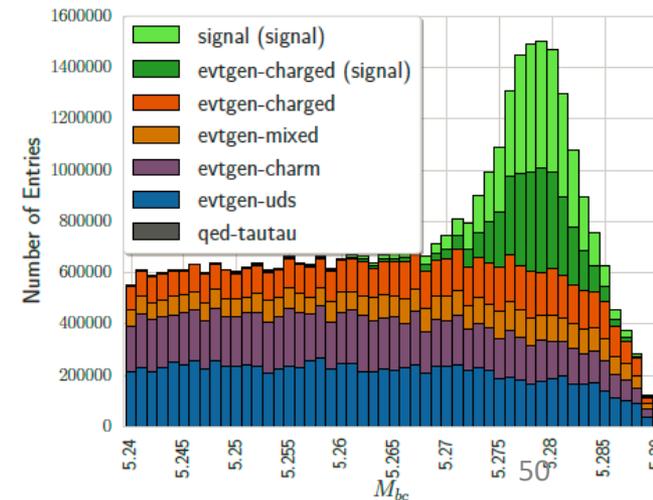
# Full Event Interpretation (FEI)

- Multivariate Technique を用いた階層的な tag side の再構成手法
  - Belle 1 より多くのモードを追加
    - $B \rightarrow D n\pi$ ,  $B \rightarrow D n\pi l\nu$ ,  $D \rightarrow K n\pi$  etc
  - Signal side を指定してアルゴリズムを最適化可能
  - Hadronic decay と semileptonic decay の両方を tag 可能
- Belle 1 の時と比較し約2倍の tagging efficiency



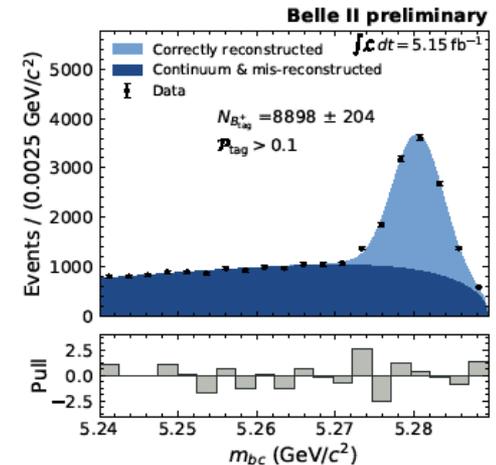
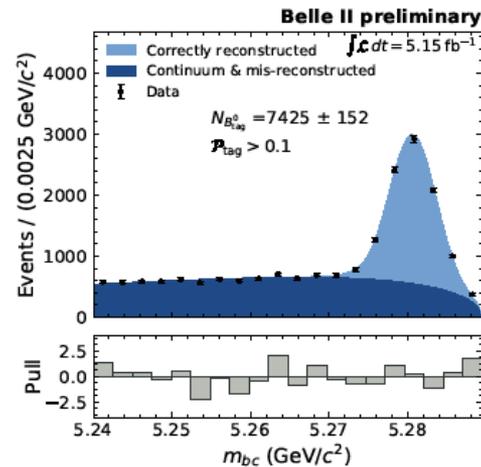
Algorithm の改善      Detector の改善と Background の効果

Tag	FR <sup>4</sup> @ Belle	FEI @ Belle MC	FEI @ Belle II MC
Hadronic $B^+$	0.28 %	0.49 %	0.61 %
Semileptonic $B^+$	0.67 %	1.42 %	1.45 %
Hadronic $B^0$	0.18 %	0.33%	0.34 %
Semileptonic $B^0$	0.63 %	1.33%	1.25 %

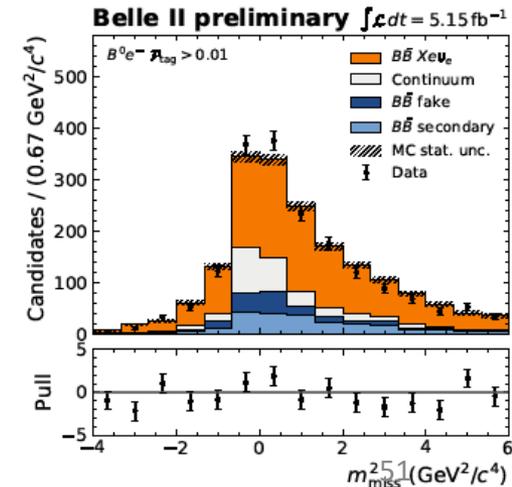
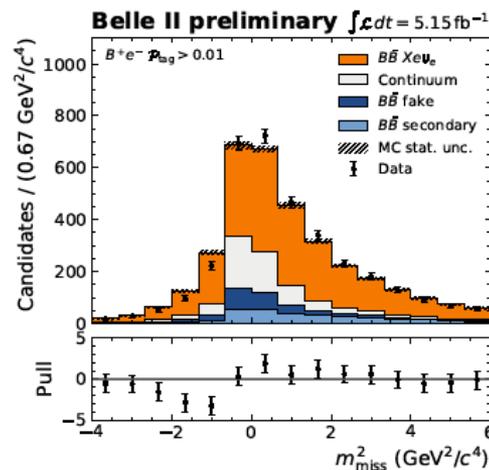


# FBI with real data

- FEI successfully reconstructed hadronic B decays



- Missing mass distributions for  $B \rightarrow X e^+ \nu$  with the tagged B meson
  - Can be used for  $|V_{cb}|$  measurement and extraction of HQE parameters



# B → D(\*)τν の測定

- Tag side を再構成したら、signal side の D(\*) と τ から の娘粒子を再構成する
- Discriminator は missing mass で final plot はカロリーメータでの余分なエネルギー  $E_{ECL}$
- 実際に測定する物理量は BF の比  $R_{D^{(*)}}$

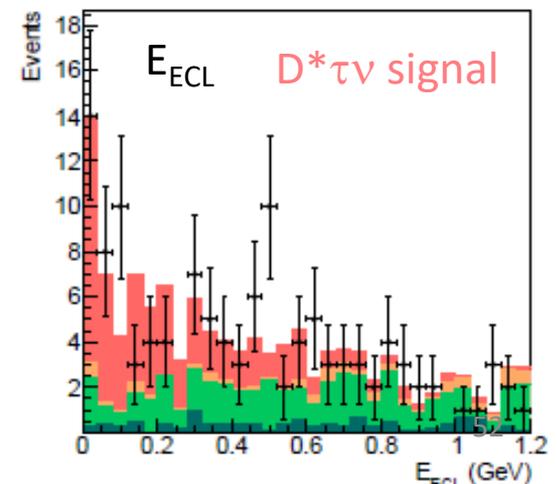
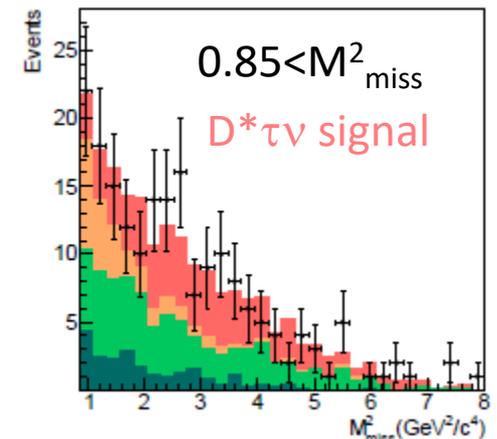
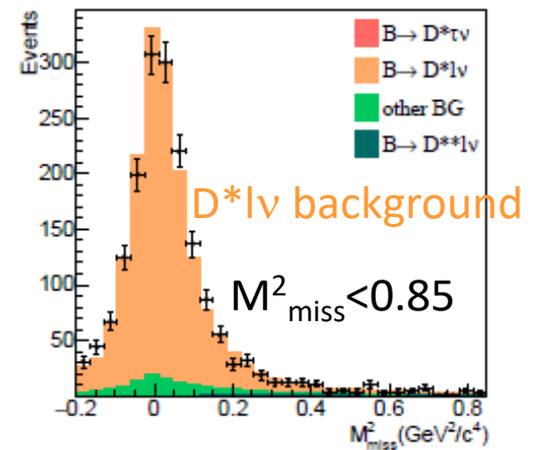
$$R_{D^{(*)}} = \frac{\text{Br}(B \rightarrow D^{(*)}\tau\nu_\tau)}{\text{Br}(B \rightarrow D^{(*)}l\nu_l)} \quad l = e, \mu$$

- 多くの理論的実験的な系統誤差がキャンセル
- 理論予言は clean (と言われている)

- Form factor
  - 実験的に  $B \rightarrow D^{(*)}l\nu$  で良く測られている (CLN → BGL?)
  - Lepton mass がかかる form factor は Lattice+Pheno で計算 (重い τ にのみ重要)
- LD QED correction (electron mode は?)

Boer, Kitahara, Nisandzic 1803.05881

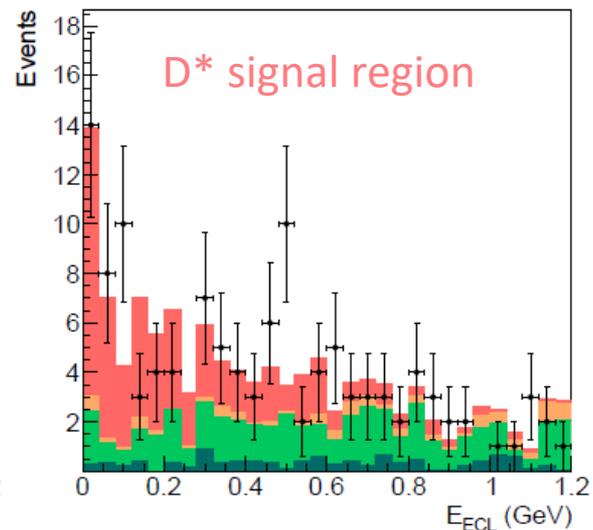
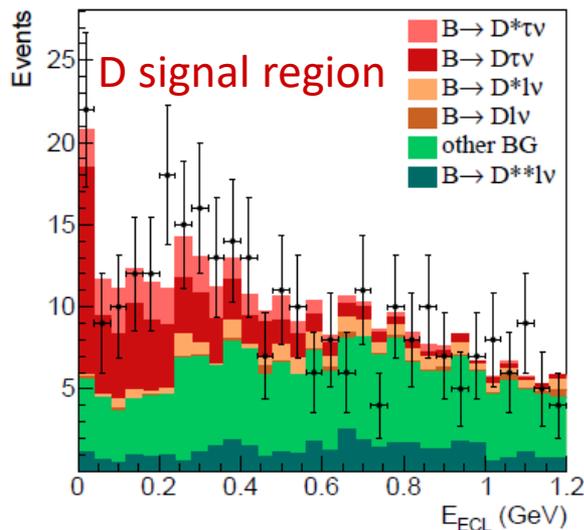
他にも  $q^2$  distribution や D\* と τ polarizations も測定可能であり、新物理模型の選別に使える



# B → D<sup>(\*)</sup>τν の背景事象

- Leptonic τ decay :  $B \rightarrow D^{**}l\nu$ ,  $D^{**} \rightarrow D^{(*)}\pi(\pi)$ 
  - もし D<sup>\*\*</sup> からの π を再構成出来なかったら背景事象となる
  - $B \rightarrow D^{(*)}l\nu$  以外は現在完全に理解出来ない
  - D<sup>\*\*</sup> 自身も現在完全に理解していない
- Hadronic τ decay :  $B \rightarrow D^{(*)}D_s X$ ,  $D^{(*)} DKX$
- もう一つは feed-down  $D^* \rightarrow D$ 
  - $B \rightarrow D^* \tau \nu$ ,  $D^* \rightarrow DX$  の X を再構成出来ないと  $B \rightarrow D \tau \nu$  の背景事象となる
  - E<sub>ECL</sub> の Simultaneous fit により分離する

} Belle II で測定可能





# Belle II Cons and Pros (VS LHCb)

- Cons.
  - **Statistics of b hadrons!!**
    - We will only have  $10^{11}$  B mesons with  $50\text{ab}^{-1}$  on Y(4S) and  $5 \times 10^8$   $B_s$  with  $5\text{ab}^{-1}$  on Y(5S)
  - No large samples of **b baryon and  $B_c$** 
    - Production of these hadrons are not yet established around Y(nS).
  - **Proper time resolution is worse** and B meson is not so boosted.
    - Background suppression with B vertex is not so easy  $\rightarrow$  fully inclusive  $b \rightarrow \text{sil}??$
    - $B_s$  mixing ( $\Delta m_s$ ) can not be measured (while  $\Delta \Gamma_s$  can be measured).

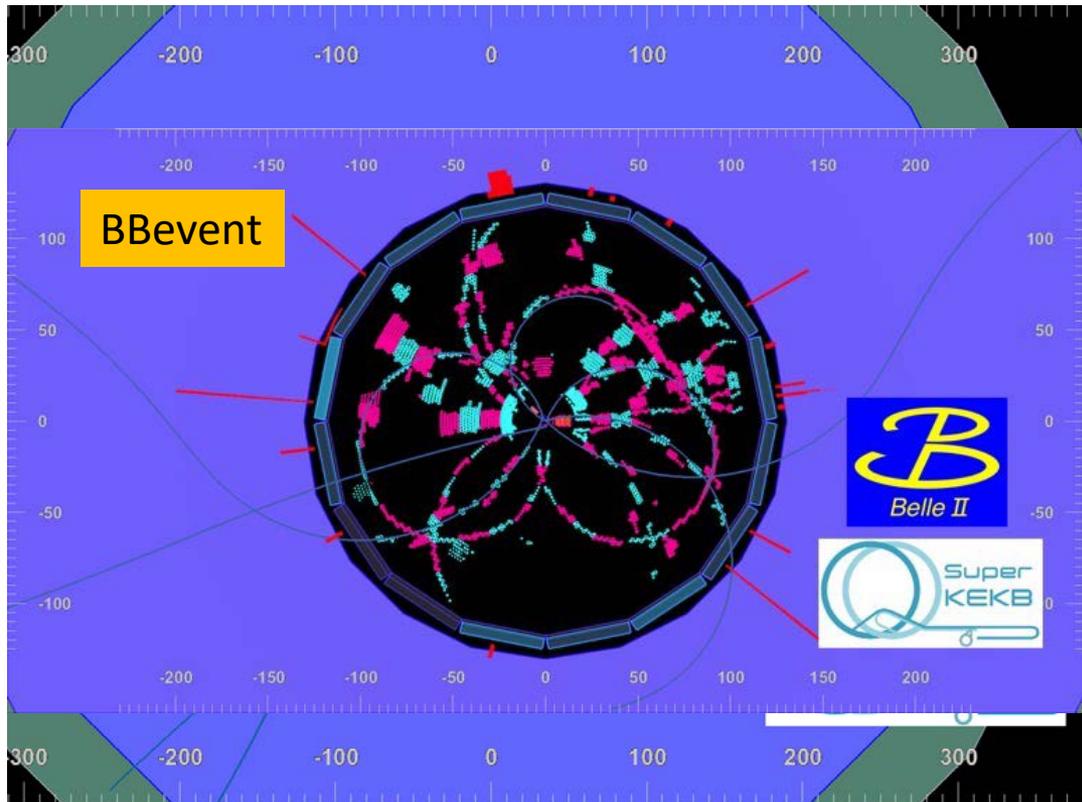
# Belle II Cons and Pros (VS LHCb)

- Pros.
  - Smaller background cross section :  $\sim 3.4\text{nb}$  for  $ee \rightarrow qq$ ,  $\sim 1\text{nb}$  for  $ee \rightarrow Y(4S) \rightarrow BB$
  - Almost **100% trigger efficiency for  $Y(4S) \rightarrow BB$**  events.
    - Main trigger : 3-track-trigger || ECL high energy trigger.
    - Absolute BF measurement possible.
  - High hermeticity  $4\pi \times 94\%$ 
    - High reconstruction efficiency of  $O(1) \sim O(10)\%$ .
    - **Full reconstruction** possible (Reconstruction of the other B meson)
    - **More than one missing neutrino modes** can be also searched for  $\rightarrow B \rightarrow K^{(*)}\nu\nu$ ,  $B \rightarrow K\tau\tau$ ,  $B \rightarrow \nu\nu$
  - Detection of **electron**
    - Detection efficiency of electron is almost the same as that for muon  $\rightarrow$  test of LFU
  - Detection of neutrals
    - $\gamma$ ,  $\pi^0$  and  $K_s$  can be reconstructed efficiently  $\rightarrow$  sum-of-exclusive approach,  $B_{(s)} \rightarrow \gamma\gamma$
    - Better energy resolution of **hard  $\gamma$**   $\rightarrow B \rightarrow \rho\gamma$  with good PID devise

# The First Collisions observed by Belle II

- 26th Apr 2018

Event Display :  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}$



People excited about the first collision  
SuperKEKB control room



Belle II control room



# Rediscoveries of B decays

- With  $2.6\text{fb}^{-1}$ 
  - We observed  $B \rightarrow J/\psi K(*)$ 
    - was golden mode for  $\sin 2\phi_1$  measurements
    - used for calibration of  $b \rightarrow sl+l-$
  - We rediscovered the penguin mode  $B \rightarrow K^*\gamma$ .

